

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie civil

ÉTUDE SUR LE COEFFICIENT D'ADHÉRENCE K_b POUR DES BARRES D'ARMATURE EN PRFV

Mémoire de maîtrise
Spécialité : Génie civil

Paul BALLET

Jury :

1. Prof. Brahim Benmokrane (Directeur de recherche)
2. Prof. Ammar Yahia (examineur)
3. Brahim Tighiouart, ing., PhD. (examineur)

RÉSUMÉ

En Amérique du nord, les ponts et structures réalisés à l'aide d'armatures en acier sont soumis à de nombreuses détériorations à cause de la corrosion des barres d'armature en acier ainsi qu'au rude climat. Il est en effet d'un enjeu majeur de se tourner vers d'autres solutions pour la réalisation de ponts et structures. Cela a introduit l'utilisation de barres d'armature en PRF afin de faire face aux contraintes structurelles mais également économiques puisque plusieurs milliards de dollars, de nos jours, dans le monde, sont utilisés dans la réhabilitation de structures. Les barres d'armatures en PRF possèdent de nombreuses propriétés qui sont différentes des barres d'armatures en acier, notamment des propriétés mécaniques élevées, mais elles améliorent également la longévité des structures. Sachant cela, il est important de pouvoir se tourner vers l'utilisation de matériaux composites pour les futures structures. Ainsi, ces dernières années, de plus en plus d'entreprises, et plus globalement la société, se tournent vers l'utilisation de matériaux composites. C'est pourquoi il est important d'effectuer des essais, des recherches sur ces nouveaux types de matériaux. Pour cela, des barres d'armature en PRFV de nom commercial : Aslan, V-ROD, ComBAR et MSTBAR ont été fournies par quatre manufacturiers du Canada et des États-Unis. Le but principal est de déterminer une corrélation entre le coefficient d'adhérence k_b de ces barres d'armature en PRFV et la force d'adhérence entre le béton et les barres d'armature. Des essais en traction et en flexion de ces barres noyées dans du béton ont été effectués pour évaluer les propriétés des barres et déterminer le coefficient d'adhérence k_b . Aussi, des essais d'arrachement et des essais sur des prismes ont réalisés dans le but de trouver une corrélation entre les paramètres cités ci-dessus. Tout ceci garantira de meilleures connaissances sur les barres d'armature en PRFV et aidera les scientifiques, sociétés et entreprises à utiliser davantage ces types de barres non sujettes à la corrosion électrochimique.

Mots-clés : Béton, matériaux composites en polymères renforcés de fibres de verre (PRF); poutres; essais de flexion; essais d'arrachement; barres d'armature; traction; contrainte d'adhérence maximum; coefficient d'adhérence k_b .

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toutes les personnes m'ayant aidé à terminer ce projet. En tout premier, je remercie très chaleureusement mon directeur de recherche Professeur Brahim Benmokrane de m'avoir accueilli au sein de son groupe de recherche et de m'avoir donné tout le support technique pour la réalisation de cette recherche. Par ailleurs, je remercie Khaled Mohamed, chercheur postdoctoral sous la direction du Professeur Brahim Benmokrane, pour son appréciable aide technique tout le long du projet, ainsi que Jérôme Lacroix et Steven MacEachern, techniciens, pour m'avoir aidé à réaliser les essais. J'ai également une pensée à mes amis et ma famille qui m'ont soutenu pendant toute ma maîtrise.

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE 1	INTRODUCTION	1
1.1	Contexte global et problématique	1
1.2	Présentation du projet de recherche	2
1.3	Objectifs de la présente étude	3
1.4	Plan du document	4
CHAPITRE 2	ÉTAT DE L'ART	6
2.1	Historique de l'acier	6
2.1.1	L'utilisation de l'acier dans les structures	6
2.1.2	Une transition vers les matériaux composites	6
2.2	Matériaux composites	6
2.2.1	Historique, normes	6
2.2.2	Définition et propriété des matériaux composites	7
2.2.3	Les fibres et les résines	7
2.2.4	Les barres en polymères renforcés de fibres (PRF)	11
2.3	L'adhérence des barres en PRF dans le béton	12
2.3.1	Les effets impactant l'adhérence des barres en PRF	12
2.3.2	Calcul des propriétés des barres en PRF selon la norme CSA S806-12	15
2.3.3	Calcul du coefficient d'adhérence selon différentes normes	16
2.3.4	Les disparités des coefficients d'adhérence	18
2.3.5	Calcul des contraintes d'adhérence lors d'essais d'arrachement	19
2.3.6	Travaux publiés auparavant	19
CHAPITRE 3	MÉTHODOLOGIE	22
3.1	Introduction	22
3.2	Matériaux	22
3.2.1	Propriétés du béton	22
3.2.2	Propriétés de l'armature en PRFV	23
3.3	Essais de traction	25
3.3.1	Paramètres étudiés	25
3.3.2	Préparation des échantillons	26
3.4	Essais de flexion	29
3.4.1	Paramètres étudiés	29
3.4.2	Détail des poutres	30
3.4.3	Programme expérimental	32
3.5	Essais d'arrachement	38
3.5.1	Paramètres étudiés	38
3.5.2	Préparation des échantillons	38
3.6	Essais des prismes	41
3.6.1	Paramètres de tests	41
3.6.2	Détail des échantillons	42
3.6.3	Préparation et instrumentation des prismes	44
3.6.4	Description des essais	46
CHAPITRE 4	ESSAIS DE TRACTION	47
4.1	Barres d'armature ComBAR	47
4.1.1	Barres d'armature ComBAR No. 5	47

4.1.2	Barres d'armature ComBAR No. 6	48
4.1.3	Barres d'armature ComBAR No. 8	49
4.2	Barres d'armature V-ROD.....	50
4.2.1	Barres d'armature V-ROD No. 5	50
4.2.2	Barres d'armature V-ROD No. 6	51
4.2.3	Barres d'armature V-ROD No. 8	52
4.3	Barres d'armature Aslan	53
4.3.1	Barres d'armature Aslan No. 5.....	53
4.3.2	Barres d'armature Aslan No. 6.....	54
4.3.3	Barres d'armature Aslan No. 8.....	55
4.4	Barres d'armature MSTBAR.....	56
4.5	Résumé des propriétés en traction des barres en PRFV	57
CHAPITRE 5	ESSAIS DE FLEXION	58
5.1	Modes de rupture	58
5.1.1	Poutres renforcées par des barres d'armature ComBAR.....	59
5.1.2	Poutres renforcées par des barres d'armature V-ROD	64
5.1.3	Poutres renforcées par des barres d'armature Aslan	72
5.1.4	Poutres renforcées par des barres d'armature MSTBAR	77
5.1.5	Résumé des modes de rupture	79
5.2	Résultats expérimentaux.....	80
5.2.1	Paramètres de tests	80
5.2.2	Flèche des poutres	82
5.2.3	Largeurs de fissure	90
5.2.4	Coefficients d'adhérence des barres d'armature en PRFV	97
CHAPITRE 6	ESSAIS D'ARRACHEMENT	101
6.1	Spécimens	101
6.2	Résultats expérimentaux.....	101
6.2.1	Contraintes d'adhérence.....	101
6.2.2	Investigation du coefficient d'adhérence kb	112
CHAPITRE 7	ESSAIS DES PRISMES.....	114
7.1	Rupture des prismes.....	114
7.2	Résultats expérimentaux.....	118
CHAPITRE 8	CONCLUSION	128

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1: Courbe contrainte/déformation PRF	11
Figure 3.1: Vue d'ensemble des barres d'armature en PRFV	23
Figure 3.2: Vue rapprochée des barres d'armature V-ROD	23
Figure 3.3: Vue rapprochée des barres d'armature Aslan.....	23
Figure 3.4: Vue rapprochée des barres d'armature ComBAR.....	24
Figure 3.5: Vue rapprochée de la barre d'armature MSTBAR.....	24
Figure 3.6: Préparation des barres d'armature en PRF pour les essais de traction.....	28
Figure 3.7: Gabarit utilisé pour placer l'extensomètre	28
Figure 3.8: Appareillage utilisé et extensomètre en place	29
Figure 3.9: Détail des poutres testées	30
Figure 3.10: Détail des cages d'armature pour des barres en PRFV de diamètre 15mm	30
Figure 3.11: Jauge de déformation.....	31
Figure 3.12: Quatre cages d'armature faites avec des barres V-ROD de diamètres nominaux 15 mm et 20 mm	31
Figure 3.13: Dimensions recommandées d'une poutre selon la norme CSA S806-12.....	32
Figure 3.14: Armatures recommandées selon la norme CSA S806-12	32
Figure 3.15: Mesure d'une largeur de fissure avec un microscope	33
Figure 3.16: Mise en place d'un LVDT.....	34
Figure 3.17: Fabrication du coffrage des poutres	34
Figure 3.18: Vue d'ensemble de quatre cages d'armature.....	35
Figure 3.19: Détail du coffrage avec les cages d'armature.....	35
Figure 3.20: Vue d'ensemble du coffrage avec les cages d'armature	35
Figure 3.21: Coulage des poutres.....	36
Figure 3.22: Poutres coulées	36
Figure 3.23: Poutre mise en place pour un essai en flexion.....	36
Figure 3.24: Jauge de déformation sur le béton	37
Figure 3.25: Visualisation d'un potentiomètre	37
Figure 3.26: Longueur d'adhérence d'une barre ComBAR.....	39
Figure 3.27: Longueur d'adhérence de barres MSTBAR.....	39
Figure 3.28: Préparation de barres No. 5 pour les essais d'arrachement.....	40
Figure 3.29: Préparation de barres No. 8 pour les essais d'arrachement.....	40
Figure 3.30: Coulage des échantillons pour les essais d'arrachement.....	40
Figure 3.31: Échantillon prêt à l'essai à l'arrachement	41
Figure 3.32: LVDT pour mesurer le glissement de la barre	41
Figure 3.33: Coffrage et préparation des prismes	42
Figure 3.34: Prismes après coulage du béton.....	44
Figure 3.35: Détail de l'instrumentation des prismes	45
Figure 3.36: Vue d'ensemble d'un prisme avant essai	46
Figure 4.1: Barres d'armature ComBAR No. 5 avant rupture.....	47
Figure 4.2: Barres d'armature ComBAR No. 5 après rupture	48
Figure 4.3: Barres d'armature ComBAR No. 6 avant rupture.....	48
Figure 4.4: Barres d'armature ComBAR No. 6 après rupture	49
Figure 4.5: Barres d'armature ComBAR No. 8 avant rupture.....	49

Figure 4.6: Barres d'armature ComBAR No. 8 après rupture	49
Figure 4.7: Barres d'armature V-ROD No. 5 avant rupture	50
Figure 4.8: Vue rapprochée de trois barres d'armature V-ROD No. 5 avant rupture	50
Figure 4.9: Barres d'armature V-ROD No. 5 après rupture	51
Figure 4.10: Barres d'armature V-ROD No. 6 avant rupture	51
Figure 4.11: Barres d'armature V-ROD No. 6 après rupture	52
Figure 4.12: Barres d'armature V-ROD No. 8 avant rupture	52
Figure 4.13: Barres d'armature V-ROD No. 8 après rupture	53
Figure 4.14: Barres d'armature Aslan No. 5 avant rupture	53
Figure 4.15: Vue rapprochée de deux barres d'armature Aslan No. 5 en PRFV avant rupture	53
Figure 4.16: Barres d'armature Aslan No. 5 après rupture	54
Figure 4.17: Barres d'armature Aslan No. 6 avant rupture	55
Figure 4.18: Barres d'armature Aslan No. 6 après rupture	55
Figure 4.19: Barres d'armature Aslan No. 8 avant rupture	55
Figure 4.20: Barres d'armature Aslan No. 8 après rupture	56
Figure 4.21: Barres d'armature MSTBAR No. 5 avant rupture	56
Figure 4.22: Barres d'armature MSTBAR No. 5 après rupture	57
Figure 5.1: Poutre C5-1 avant rupture	59
Figure 5.2: Poutre C5-1 après rupture	59
Figure 5.3: Poutre C5-2 avant rupture	60
Figure 5.4: Poutre C5-2 après rupture	60
Figure 5.5: 2 ^{ème} vue poutre C5-2 après rupture	60
Figure 5.6: Poutre C6-1 avant rupture	61
Figure 5.7: Poutre C6-1 après rupture	61
Figure 5.8: 2 ^{ème} vue poutre C6-1 après rupture	61
Figure 5.9: Poutre C6-2 avant rupture	62
Figure 5.10: Poutre C6-2 après rupture	62
Figure 5.11: Poutre C8-1 avant rupture	63
Figure 5.12: Poutre C8-1 après rupture	63
Figure 5.13: 2 ^{ème} vue poutre C8-1 après rupture	63
Figure 5.14: Poutre C8-2 avant rupture	63
Figure 5.15: Poutre C8-2 après rupture	64
Figure 5.16: 2 ^{ème} vue poutre C8-2 après rupture	64
Figure 5.17: Poutre P5-1 avant rupture	64
Figure 5.18: Poutre P5-1 après rupture	65
Figure 5.19: 2 ^{ème} vue poutre P5-1 après rupture	65
Figure 5.20: Poutre P5-2 avant rupture	65
Figure 5.21: Poutre P5-2 après rupture	66
Figure 5.22: 2 ^{ème} vue poutre P5-2 après rupture	66
Figure 5.23: Poutre P6-1 avant rupture	67
Figure 5.24: Poutre P6-1 après rupture	67
Figure 5.25: 2 ^{ème} vue poutre P6-1 après rupture	67
Figure 5.26: Poutre P6-2 avant rupture	68
Figure 5.27: Poutre P6-2 après rupture	68
Figure 5.28: 2 ^{ème} vue poutre P6-2 après rupture	68
Figure 5.29: Poutre P8-1 avant rupture	69

Figure 5.30: Poutre P8-1 après rupture	70
Figure 5.31: 2 ^{ème} vue poutre P8-1 après rupture	70
Figure 5.32: Poutre P8-2 avant rupture	70
Figure 5.33: Poutre P8-2 après rupture	71
Figure 5.34: 2 ^{ème} vue poutre P8-2 après rupture	71
Figure 5.35: Poutre A5-1 avant rupture	72
Figure 5.36: Poutre A5-1 après rupture (rupture par compression du béton)	72
Figure 5.37: 2 ^{ème} vue poutre A5-1 après rupture	72
Figure 5.38: Poutre A5-2 avant rupture	73
Figure 5.39: Poutre A5-2 après rupture (rupture équilibrée)	73
Figure 5.40: Rupture des barres poutre A5-2	73
Figure 5.41: Poutre A6-1 avant rupture	74
Figure 5.42: Poutre A6-1 après rupture	74
Figure 5.43: 2 ^{ème} vue poutre A6-1 après rupture	74
Figure 5.44: Poutre A6-2 avant rupture	74
Figure 5.45: Poutre A6-2 après rupture	75
Figure 5.46: 2 ^{ème} vue poutre A6-2 après rupture	75
Figure 5.47: Poutre A8-1 avant rupture	75
Figure 5.48: Poutre A8-1 après rupture	75
Figure 5.49: 2 ^{ème} vue poutre A8-1 après rupture	76
Figure 5.50: Poutre A8-2 avant rupture	76
Figure 5.51: Poutre A8-2 après rupture	76
Figure 5.52: 2 ^{ème} vue poutre A8-2 après rupture	77
Figure 5.53: Poutre M5-1 avant rupture	77
Figure 5.54: Poutre M5-1 après rupture	77
Figure 5.55: 2 ^{ème} vue poutre M5-1 après rupture	78
Figure 5.56: Poutre M5-2 avant rupture	78
Figure 5.57: Poutre M5-2 après rupture	78
Figure 5.58: 2 ^{ème} vue poutre M5-2 après rupture	79
Figure 5.59: Trois potentiomètres sous la poutre	82
Figure 5.60: Charge en fonction de la flèche – Poutre A5-1	82
Figure 5.61: Charge en fonction de la flèche – Poutre A5-2	82
Figure 5.62: Charge en fonction de la flèche – Poutre A6-1	83
Figure 5.63: Charge en fonction de la flèche – Poutre A6-2	83
Figure 5.64: Charge en fonction de la flèche – Poutre A8-1	83
Figure 5.65: Charge en fonction de la flèche – Poutre A8-2	83
Figure 5.66: Charge en fonction de la flèche – Poutre P5-1	83
Figure 5.67: Charge en fonction de la flèche – Poutre P5-2	83
Figure 5.68: Charge en fonction de la flèche – Poutre P6-1	84
Figure 5.69: Charge en fonction de la flèche – Poutre P6-2	84
Figure 5.70: Charge en fonction de la flèche – Poutre P8-1	84
Figure 5.71: Charge en fonction de la flèche – Poutre P8-2	84
Figure 5.72: Charge en fonction de la flèche – Poutre C5-1	85
Figure 5.73: Charge en fonction de la flèche – Poutre C5-2	85
Figure 5.74: Charge en fonction de la flèche – Poutre C6-1	85
Figure 5.75: Charge en fonction de la flèche – Poutre C6-2	85

Figure 5.76: Charge en fonction de la flèche – Poutre C8-1	85
Figure 5.77: Charge en fonction de la flèche – Poutre C8-2	85
Figure 5.78: Charge en fonction de la flèche – Poutre M5-1	86
Figure 5.79: Charge en fonction de la flèche – Poutre M5-1	86
Figure 5.80: Charge en fonction de la flèche – Poutres renforcées avec des barres d'armature No. 5	87
Figure 5.81: Charge en fonction de la flèche – Poutres renforcées avec des barres d'armature No. 6	87
Figure 5.82: Charge en fonction de la flèche – Poutres renforcées avec des barres d'armature No. 8	88
Figure 5.83: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutre A5-1	92
Figure 5.84: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutre A5-2	92
Figure 5.85: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutre A6-1	92
Figure 5.86: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutre A6-2	92
Figure 5.87: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutre A8-1	92
Figure 5.88: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutre A8-2	92
Figure 5.89: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutre P5-1	93
Figure 5.90: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutre P5-2	93
Figure 5.91: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutre P6-1	93
Figure 5.92: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutre P6-2	93
Figure 5.93: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutre P8-1	93
Figure 5.94: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutre P8-2	93
Figure 5.95: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutre C5-1	94
Figure 5.96: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutre C5-2	94
Figure 5.97: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutre C6-1	94
Figure 5.98: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutre C6-2	94
Figure 5.99: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutre C8-1	94
Figure 5.100: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutre C8-2	94
Figure 5.101: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutre M5-1	95
Figure 5.102: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutre M5-2	95
Figure 5.103: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutres renforcées avec des barres d'armature No. 5	96
Figure 5.104: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutres renforcées avec des barres d'armature No. 6	96
Figure 5.105: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutres renforcées avec des barres d'armature No. 8	96
Figure 6.1: Charge en fonction du glissement – Spécimens P5	102
Figure 6.2: Barre P5	102
Figure 6.3: Charge en fonction du glissement – Spécimens P6	103
Figure 6.4: Barre P6	103
Figure 6.5: Charge en fonction du glissement – Spécimens P8	104
Figure 6.6: Barre P8	104
Figure 6.7: Charge en fonction du glissement – Spécimens A5	105
Figure 6.8: Barre A5	105
Figure 6.9: Charge en fonction du glissement – Spécimens A6	106
Figure 6.10: Barre A6	106

Figure 6.11: Charge en fonction du glissement – Spécimens A8	107
Figure 6.12: Barre A8	107
Figure 6.13: Charge en fonction du glissement – Spécimens C5	108
Figure 6.14: Barre C5	108
Figure 6.15: Charge en fonction du glissement – Spécimens C6	109
Figure 6.16: Barre C6	109
Figure 6.17: Charge en fonction du glissement – Spécimens C8	110
Figure 6.18: Barre C8	110
Figure 6.19: Vue d'ensemble des barres en PRFV après les essais d'arrachement.....	111
Figure 6.20: Coefficients k_b vs K pour les barres No.5.....	113
Figure 6.21: Coefficients k_b vs K pour les barres No.6.....	113
Figure 6.22: Coefficients k_b vs K pour les barres No.8.....	113
Figure 6.23: Coefficients k_b vs K pour toutes les barres.....	113
Figure 7.1: Prisme PR-P5 après rupture	115
Figure 7.2: Prisme PR-A5 après rupture.....	115
Figure 7.3: Prisme PR-C5 après rupture	115
Figure 7.4: Prisme PR-P6 après rupture	116
Figure 7.5: Prisme PR-A6 après rupture.....	116
Figure 7.6: Prisme PR-C6 après rupture	116
Figure 7.7: Réseau de fissures – PR-P5	117
Figure 7.8: Réseau de fissures – PR-A5	117
Figure 7.9: Réseau de fissures – PR-C5.....	117
Figure 7.10: Réseau de fissures – PR-P6.....	117
Figure 7.11: Réseau de fissures – PR-A6	117
Figure 7.12: Réseau de fissures – PR-C6.....	117
Figure 7.13: Charge en fonction de l'élongation - PR-P5	119
Figure 7.14: Vue rapprochée - Charge en fonction de l'élongation - PR-P5.....	119
Figure 7.15: Largeur de fissure en fonction de l'élongation - PR-P5	119
Figure 7.16: Contrainte en fonction de l'élongation - PR-P5	119
Figure 7.17: Charge en fonction de l'élongation - PR-A5.....	120
Figure 7.18: Vue rapprochée - Charge en fonction de l'élongation - PR-A5	120
Figure 7.19: Largeur de fissure en fonction de l'élongation - PR-A5	120
Figure 7.20: Contrainte en fonction de l'élongation - PR-A5	120
Figure 7.21: Charge en fonction de l'élongation - PR-C5.....	121
Figure 7.22: Vue rapprochée - Charge en fonction de l'élongation - PR-C5	121
Figure 7.23: Largeur de fissure en fonction de l'élongation - PR-C5	121
Figure 7.24: Contrainte en fonction de l'élongation - PR-C5.....	121
Figure 7.25: Charge en fonction de l'élongation - PR-P6	122
Figure 7.26: Vue rapprochée - Charge en fonction de l'élongation - PR-P6.....	122
Figure 7.27: Largeur de fissure en fonction de l'élongation - PR-P6.....	122
Figure 7.28: Contrainte en fonction de l'élongation - PR-P6	122
Figure 7.29: Charge en fonction de l'élongation - PR-A6.....	123
Figure 7.30: Vue rapprochée - Charge en fonction de l'élongation - PR-A6	123
Figure 7.31: Largeur de fissure en fonction de l'élongation - PR-A6	123
Figure 7.32: Contrainte en fonction de l'élongation - PR-A6	123
Figure 7.33: Charge en fonction de l'élongation - PR-C6	124

Figure 7.34: Vue rapprochée - Charge en fonction de l'élongation - PR-C6	124
Figure 7.35: Largeur de fissure en fonction de l'élongation - PR-C6.....	124
Figure 7.36: Contrainte en fonction de l'élongation - PR-C6.....	124
Figure 7.37: Comparaison des coefficients k_b obtenus lors des différents essais	126
Figure 7.38: Relation entre les coefficients k_b provenant des essais des poutres et des prismes	126

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Description des produits.....	2
Tableau 2.1: Types de fibres de carbone.....	8
Tableau 2.2: Avantages/inconvénients des fibres de carbone.....	8
Tableau 2.3: Avantages/inconvénients des fibres d'aramide.....	9
Tableau 2.4: Avantages/inconvénients des fibres de verre.....	10
Tableau 2.5: Propriétés des résines thermodurcissables.....	10
Tableau 3.1: Propriétés des barres d'armature en PRFV.....	24
Tableau 3.2: Diamètres et aires des barres d'armature en PRFV mesurées expérimentalement.....	25
Tableau 3.3: Longueurs minimales recommandées pour les tubes en acier.....	26
Tableau 3.4: Résumé des longueurs L_g et des barres en PRFV pour les essais de traction.....	27
Tableau 3.5: Détail des propriétés des prismes.....	43
Tableau 4.1: Propriétés en traction des barres d'armature ComBAR No. 5.....	47
Tableau 4.2: Propriétés en traction des barres d'armature ComBAR No. 6.....	48
Tableau 4.3: Propriétés en traction des barres d'armature ComBAR No. 8.....	49
Tableau 4.4: Propriétés en traction des barres d'armature V-ROD No. 5.....	50
Tableau 4.5: Propriétés en traction des barres d'armature V-ROD No. 6.....	51
Tableau 4.6: Propriétés en traction des barres d'armature V-ROD No. 8.....	52
Tableau 4.7: Propriétés en traction des barres d'armature Aslan No. 5.....	53
Tableau 4.8: Propriétés en traction des barres d'armature Aslan No. 6.....	54
Tableau 4.9: Propriétés en traction des barres d'armature Aslan No. 8.....	55
Tableau 4.10: Propriétés en traction des barres d'armature MSTBAR No. 5.....	56
Tableau 4.11: Résumé des propriétés calculées pour chaque diamètre de barres.....	57
Tableau 5.1: Désignation des poutres.....	58
Tableau 5.2: Modes de rupture des poutres.....	78
Tableau 5.3: Paramètres de tests.....	80
Tableau 5.4: Flèches et charges maximales des poutres.....	88
Tableau 5.5: Premières largeurs de fissure et charges apparues à la 1 ^{ère} fissure.....	90
Tableau 5.6: Coefficients d'adhérence des barres d'armature en PRFV.....	98
Tableau 6.1: Contraintes d'adhérence P5.....	102
Tableau 6.2: Contraintes d'adhérence P6.....	103
Tableau 6.3: Contraintes d'adhérence P8.....	104
Tableau 6.4: Contraintes d'adhérence A5.....	105
Tableau 6.5: Contraintes d'adhérence A6.....	106
Tableau 6.6: Contraintes d'adhérence A8.....	107
Tableau 6.7: Contraintes d'adhérence C5.....	108
Tableau 6.8: Contraintes d'adhérence C6.....	109
Tableau 6.9: Contraintes d'adhérence C8.....	110
Tableau 6.10: Résumé contraintes d'adhérence.....	111
Tableau 6.11: Valeurs de K.....	112
Tableau 7.1: Propriété des barres des prismes.....	118
Tableau 7.2: Coefficients d'adhérence - Prismes.....	125

LISTE DES ACRONYMES

CSA	Association canadienne de normalisation (Canadian Standard Association)
ISIS	Innovations en structures avec systèmes de détection intégrés (Intelligent Sensing for Innovative Structures)
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
PRF	Polymères Renforcés de Fibres
PRFV	Polymères Renforcés de Fibres de Verre
PRFA	Polymères Renforcés de Fibres d'Aramide
PRFC	Polymères Renforcés de Fibres de Carbone
PRFB	Polymères Renforcés de Fibres de Basalte

LISTE DES SYMBOLES

d_b	Diamètre des barres
d_c	Epaisseur de l'enrobage de béton
E_f	Module d'élasticité des barres en PRF
f_{cr}	Contrainte de traction en flexion
f_f	Contrainte en traction de l'armature de PRF
k_b	Coefficient d'adhérence
M_s	Moment de service
s	Espacement longitudinal des barres en PRF
w	Largeur maximale de fissure en mm
β	Rapport de la distance mesurée entre la fibre tendue extrême et l'axe neutre et la distance mesurée entre le centre de tension et l'axe neutre ;

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Contexte global et problématique

Les ponts et structures en Amérique du nord datant d'il y a plus de 20/30 ans ont été réalisés avec des barres d'armature en acier puisqu'auparavant les armatures en polymères renforcés de fibres (PRF) n'étaient pas commercialisées et donc n'étaient pas utilisées. Ainsi, de nombreuses recherches et alternatives aux barres d'armature en PRF ont été engagées depuis peu et de plus en plus de pays commencent à s'y intéresser, même en France. Les recherches sont nombreuses et ont pour la plupart abouties à de nombreux résultats en énonçant le fait que les matériaux composites sont une bonne alternative aux barres d'armature en acier étant donné leurs propriétés mécaniques élevées ainsi que la bonne amélioration de la longévité des structures, ce qui limite les coûts de réhabilitation : c'est donc très intéressant.

Les barres d'armature en polymères renforcés de fibres (PRF) n'ont pas que des avantages par rapport à l'acier ce qui peut impliquer une réticence à utiliser ce type de matériaux. En effet :

- Les barres ont un comportement plus élastique que l'acier, ainsi lorsqu'elles sont sollicitées en traction, elles ne tendent pas à rompre comme les barres en acier;
- Les barres en PRF ont un module d'élasticité plus faible que l'acier ce qui peut impliquer l'apparition de déformations et de fissures.

Le manque d'information concernant ces barres ont conduit à de nombreuses recherches cruciales, il y a donc des paramètres importants à prendre en considération, notamment l'évaluation du coefficient d'adhérence k_b de ces barres qui est un paramètre bien différent de celui de barres renforcées en acier. Des études ont été menées mais le comportement de ces barres en PRF n'est pas encore bien compris et de nombreuses questions se posent encore. De nombreuses informations restent encore à être développées ou sont encore inconnues. C'est le cas des paramètres et de l'utilisation des barres en polymères renforcées de fibres de verre. L'évaluation du coefficient d'adhérence k_b demeure incertaine, donc comment peut-on le calculer précisément pour chaque barre ?

Une autre interrogation demeure : peut-on trouver une corrélation entre la valeur du coefficient d'adhérence k_b et la force d'adhérence ?

1.2 Présentation du projet de recherche

Ce projet a émergé afin de faire évoluer les connaissances, et les normes concernant les coefficients d'adhérence sur des barres d'armature en polymères renforcées de fibres de verre (PRFV) avec différentes surfaces et différents manufacturiers. Nous verrons par la suite que l'étude des coefficients d'adhérence est une partie assez volumineuse en termes de recherche. Il sera important de trouver une solution pour pouvoir évaluer les coefficients d'adhérence des barres d'armature en PRF de façon plus simple. L'enjeu a donc été d'étudier la faisabilité de cette solution. C'est à ce moment que l'idée de faire plusieurs tests relativement simples a été évoquée pour créer un lien entre les résultats obtenus lors de ces différents tests : ceci permettra notamment de réduire le coût et la durée des futurs projets concernant les calculs de coefficients d'adhérence. La description de ces tests sera expliquée ultérieurement. Quatre types de barres portant le nom commercial : MSTBAR, Aslan, V-ROD et ComBAR sont donc étudiées, elles sont présentées de la manière suivante :

Nom commercial de l'armature/Manufacturier	Nombre de barres	Diamètre nominal (mm)	Type de surface extérieure
MSTBAR/B&B FRP Manufacturing Inc.	5	15	Déformée
Aslan/Owens Corning Composites	5	15	Déformée et sablée
	5	20	
	5	25	
V-ROD/Pultrall Inc.	5	15	Sablée
	5	20	
	5	25	
ComBAR/Fiberline Composites Canada Inc.	5	15	Rainurée
	5	20	
	5	25	

Tableau 1.1: Description des produits

Les essais permettront, d'une part, de calculer des coefficients d'adhérence différents selon les types de barre et les manufacturiers et ensuite de trouver une corrélation entre la force d'adhérence et le coefficient d'adhérence.

1.3 Objectifs de la présente étude

Afin de garantir la bonne réussite d'un projet, il faut bien définir les hypothèses mais il faut pouvoir également bien cadrer le projet, le planifier et avoir des objectifs clairs et concis.

L'objectif principal peut être défini de la manière suivante: trouver une corrélation entre le coefficient d'adhérence k_b et les forces de liaisons entre le béton et les armatures en PRFV.

Pour parvenir à cet objectif, plusieurs objectifs secondaires devront être atteints.

En effet, pour trouver cette corrélation, les objectifs secondaires à atteindre sont les suivants :

1. Essais de traction
 - a) Préparer chaque barre pour réaliser des essais en traction;
 - b) Étudier chaque barre d'armature en traction (en réalisant des essais de traction) pour pouvoir trouver certains paramètres utiles de ces barres comme par exemple la force ultime à laquelle la barre cède, le module d'élasticité, la déformation ultime, etc.
2. Analyse du coefficient d'adhérence
 - a) Réaliser le coffrage et le coulage de poutres;
 - b) Étudier les poutres en flexion et estimer le coefficient d'adhérence de chaque barre.
3. Essais « pull-out »
 - a) Préparer les barres d'armature pour les essais d'arrachement (« pull-out »);
 - b) Étudier les paramètres obtenus lors des essais « pull-out ».
4. Essais des « prismes »
 - a) Réaliser le coffrage et le coulage de six prismes;
 - b) Étudier les paramètres obtenus lors des essais des « prismes ».

Les essais d'arrachement et les prismes ont pour objectif de garantir un lien entre la force d'adhérence et les coefficients d'adhérence trouvés lors de la phase d'essais des poutres. Ceci permettra de simplifier en temps et en coûts les futurs tests qui serviront à calculer les coefficients d'adhérence des barres d'armature en PRF.

1.4 Plan du document

État de l'art

L'état de l'art présente un historique de l'acier avec son utilisation dans les structures en béton armé. Ensuite, un bref historique des PRF, ainsi que les propriétés des PRF sont décrits, en mentionnant dans le détail quelques propriétés des fibres et résines des PRF. L'adhérence étant le sujet clé du projet, un paragraphe important sera consacré aux calculs et aux diverses recherches menées auparavant dans ce domaine.

Méthodologie

Cette partie du document présente les différents aspects nécessaires pour investiguer le coefficient d'adhérence k_b des barres en PRF, en passant par des tests de tractions, des essais de poutres, des essais d'arrachement et des essais sur des prismes.

Essais de traction sur des barres d'armature en PRFV

Des résultats concernant les propriétés en traction des barres d'armature en PRFV (résistance en traction, module d'élasticité et déformation en traction ultime) sont présentés dans cette partie. Ces essais ont été réalisés conformément à la norme ASTM D7205 / D7205M 06.

Essais de flexion sur poutres en béton armé de barres en PRFV

Ce chapitre se concentre sur les résultats liés aux essais de flexion sur des poutres en béton armé de barres en PRFV. Ces essais permettant de déterminer le coefficient k_b ont été réalisés conformément à la norme CSA S806 (Annexe S)

Essais d'arrachement de barres en PRFV noyées dans des blocs en béton

Les essais d'arrachement de barres en PRFV noyées dans des blocs en béton sont traités dans cette partie. Les résultats y sont présentés afin de voir si une corrélation peut être trouvée entre la rigidité exprimée par la relation contrainte d'adhérence –glissement et le coefficient d'adhérence k_b des barres en PRFV testées. Ces essais ont été réalisés conformément à la norme ASTM D7913 / D7913M - 14

Essais de traction sur des barres en PRFV noyées dans des prismes en béton

Les résultats liés aux essais de traction des barres en PRFV noyées dans des prismes en béton sont présentés dans ce chapitre. Ces essais appelés «essais de tirant» permettent de simuler le comportement en traction de barre d'armature dans la zone tendue d'une poutre en béton armé

soumise à de la flexion. Le développement de fissures dans le prisme en fonction de la charge de traction appliquée incluant le nombre de fissures, l'espacement entre les fissures et la largeur des fissures sera analysé et comparé aux résultats des essais de flexion sur poutres. Le coefficient d'adhérence k_b déterminé à partir de ces essais sera comparé à celui déterminé des essais de flexion sur poutres en béton armé de PRFV.

CHAPITRE 2 ÉTAT DE L'ART

2.1 Historique de l'acier

2.1.1 L'utilisation de l'acier dans les structures

L'acier a été utilisé et est encore utilisé comme armature dans les structures mais de nos jours, d'autres solutions sont envisagées à cause du coût des détériorations dues à la corrosion de l'acier et à la rigueur du climat. En Amérique du Nord des dizaines de milliers de ponts sont déficients structurellement.

Certaines solutions sont envisagées et le but reste de maintenir l'armature à un niveau de corrosion faible pour éviter les déficiences structurales importantes.

2.1.2 Une transition vers les matériaux composites

D'autres types d'armature sont étudiés, notamment les matériaux composites qui sont une alternative viable en génie civil. Plusieurs structures ont été réalisées grâce aux polymères renforcés de fibres (PRF). En effet, plusieurs nouveaux ponts sont construits à l'aide de matériaux qui ont des propriétés plus élevées que l'acier, qui sont plus légers et plus durables dans le temps. C'est le cas de ponts comme le pont Taylor (Hutchinson, R., Abdelrahman, A. and Rizkalla, 1998), le pont Joffre ou le pont de Wotton (El-Salakawy, E., Benmokrane, B., and Desgagné, G., 2003) par exemple qui ont été fait en partie avec des barres en polymères renforcées de fibres.

2.2 Matériaux composites

2.2.1 Historique, normes

Les matériaux composites sont utilisés depuis des décennies dans le domaine de l'aérospatial, l'aéronautique ou encore l'automobile (ISIS Manuel No.3, 2007) mais ils sont utilisés depuis seulement une vingtaine, trentaine d'années dans le domaine du génie civil et c'est pour cette raison que les normes et codes n'existent pas depuis très longtemps, cependant cela a

rapidement évolué ces dix dernières années (Newman et al., 2007) même si des questions demeurent encore.

2.2.2 Définition et propriété des matériaux composites

Les matériaux composites sont composés généralement de deux matériaux non miscibles et ce nouveau matériau obtient ainsi des propriétés et performances plus élevées que si les éléments étaient séparés. Les matériaux composites sont constitués de deux composants qui sont appelés « renforts » (ils assurent la tenue mécanique) et appelés « matrice » (la matrice assure la cohésion de la structure et fournit un transfert de charges entre les renforts).

Les renforts sont les fibres du matériau alors que la matrice est la résine.

- Les fibres peuvent être du carbone, de l'aramide ou encore du verre. Il existe des fibres de basalte mais elles ne sont pas encore incorporées dans les normes actuelles (Walsh, 2001).
- Les résines utilisées habituellement sont l'époxy, le vinyl ester.

Dans les matériaux composites, les fibres contribuent au maintien du support de charges, et fournissent la résistance et la rigidité selon l'axe des fibres tandis que les résines ont pour rôles de lier et maintenir les fibres en position, de permettre le transfert et la redistribution de charge entre les fibres et de protéger les fibres contre l'environnement (ISIS Manuel No.3, 2007).

2.2.3 Les fibres et les résines

2.2.3.1 Les fibres

Comme mentionné auparavant, les fibres utilisées en génie civil sont du carbone, de l'aramide ou du verre selon les normes (CNA/CSA S806, 2012) mais le basalte quant à lui ne peut être utilisé. Les propriétés des fibres diffèrent selon le type : par exemple, les fibres de carbone ont un module d'élasticité variant de 230 à 760 GPa alors que les fibres de verre ont un module d'élasticité variant de 70 à 90 GPa et c'est encore différent pour les fibres d'aramide (ISIS Manuel No.3, 2007). Les fibres ont généralement de bonnes propriétés mécaniques et chimiques, et les plus utilisées dans l'industrie de composites PRF sont les fibres de verre.

2.2.3.1.1 Les fibres de carbone

Elles ont les propriétés longitudinales suivantes :

- Module d'élasticité variant de 230 à 760 GPa;
- Résistance à la traction : 2500 à 4000 MPa;
- Déformation ultime de 0.4% à 1.8%

Plusieurs types de fibres de carbone existent. Ces fibres qui diffèrent les unes des autres sont décrites dans le tableau qui suit:

Selon le type de précurseur	Selon le module d'élasticité
Fibres isotropiques : PITCH	Faible : 200 – 250 GPa
	Intermédiaire : 290 – 300 GPa
Fibres polyacrylonitriles : PAN	Élevé : 350 – 380 GPa
	Très élevé : 480 – 800 GPa

Tableau 2.1: Types de fibres de carbone

Les fibres de carbone ont des propriétés mécaniques très intéressantes mais elles sont moins utilisées que les fibres de verre du fait de leurs coûts élevés. Quelques avantages et inconvénients de ce type de fibres sont ainsi présentés:

Avantages	Inconvénients
Grande résistance en tension, en compression et à la fatigue	Coût élevé
Excellente tenue à haute température	Imprégnation difficile par les résines
Excellente rigidité	Sensibilité aux impacts et à l'abrasion
Bonne conductivité électrique et thermique	Faible ténacité
Inertie complète à la corrosion et aux produits chimiques	Etc.

Tableau 2.2: Avantages/inconvénients des fibres de carbone

2.2.3.1.2 Les fibres d'aramide

Les fibres d'aramide ont les propriétés longitudinales suivantes :

- Module d'élasticité variant de 70 à 180 GPa ;
- Résistance à la traction : 2800 à 4000 MPa ;
- Déformation ultime de 1.9% à 4.6%.

Les fibres d'aramide sont peu utilisées sur le marché mais elles possèdent de nombreux avantages :

Avantages	Inconvénients
Haute résistance spécifique à la traction	Faible résistance à compression, à la flexion et au flambage
Faible masse volumique	Imprégnation difficile par les résines
Excellente résistance à l'impact et au choc	Usinage difficile
Isolant thermique et magnétique	Absorption d'humidité
Grande rigidité	Etc.

Tableau 2.3: Avantages/inconvénients des fibres d'aramide

2.2.3.1.3 Les fibres de verre

Les fibres de verre ont les propriétés longitudinales suivantes :

- Module d'élasticité variant de 70 à 90 GPa ;
- Résistance à la traction : 2000 à 5000 MPa ;
- Déformation ultime de 2.0% à 5.6%.

Les fibres de verre sont les plus utilisées dans l'industrie des matériaux composites en génie civil. Plusieurs types de fibres de verre existent :

- Type E : électrique
- Type S : résistance
- Type C : chimique

- Type AR : résistance aux alcalis

Leur coût étant relativement faible leurs propriétés mécaniques et chimiques étant élevées, elles sont utilisées davantage que les autres fibres:

Avantages	Inconvénients
Coût faible	Densité plus élevée
Grande résistance en traction et aux produits chimiques	Sensibilité à l'abrasion
Grande ténacité	Faible module d'élasticité
Excellent isolant	Corrosion possible aux alcalis
Bonne fiabilité	

Tableau 2.4: Avantages/inconvénients des fibres de verre

2.2.3.2 Les résines

Les résines sont classées sous deux grandes familles :

- Les résines thermoplastiques : elles s'adoucissent sous la chaleur et se durcissent sous le froid, c'est une action réversible;
- Les résines thermodurcissables : elles subissent une réaction chimique irréversible.

Cependant, les résines utilisées sont les résines de type thermodurcissables puisque selon les codes et guides de calcul en usage, ce sont les seules qui sont acceptées. Il en est de même pour les deux types de résines thermodurcissables qui sont le vinyl ester et l'époxy.

Les propriétés des résines thermodurcissables sont les suivantes:

Résine	Masse volumique (g/cm³)	Résistance en traction (MPa)	Module en traction (GPa)	Retrait à la cure (%)
Époxy	1,20 – 1,30	55,00 – 130,00	2,75 – 4,10	1,00 – 5,00
Polyester	1,10 – 1,40	34,50 – 103,50	2,10 – 3,45	5,00 – 12,00
Vinyl Ester	1,12 – 1,32	73,00 – 81,00	3,00 – 3,35	5,40 – 10,30

Tableau 2.5: Propriétés des résines thermodurcissables

2.2.4 Les barres en polymères renforcés de fibres (PRF)

Ce sont les fibres et la matrice qui vont donner toutes les propriétés aux barres en PRF, il n'est pas possible d'utiliser seulement les fibres, ou seulement la matrice.

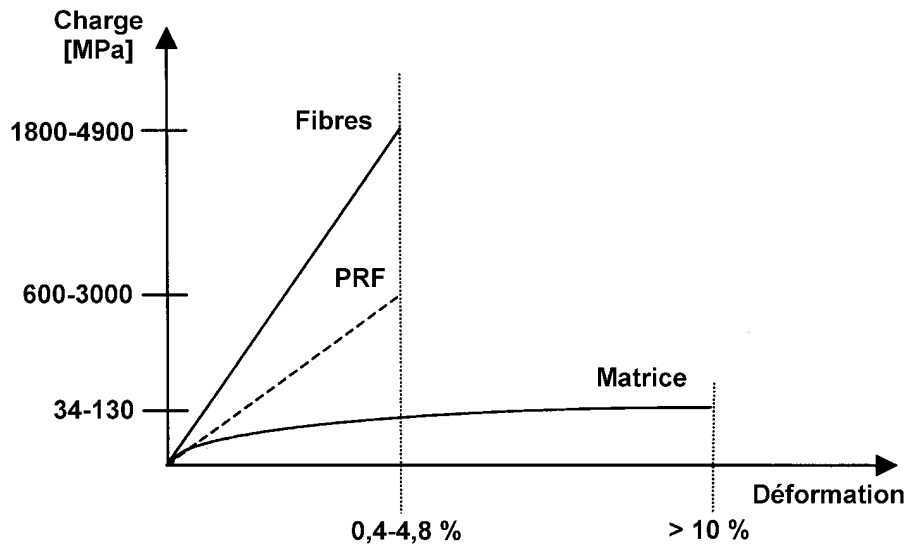


Figure 2.1: Courbe contrainte/déformation PRF

Cette courbe montre que les fibres et la matrice composent et donnent les propriétés désirées des PRF.

Les propriétés des PRF sont variables selon le type. Les fibres utilisées étant de l'aramide, du verre ou du carbone, les PRF correspondants sont les polymères renforcés de fibres d'aramide (PRFA), de carbone (PRFC) ou encore de verre (PRFV).

Les principaux avantages des PRF sont leur non-corrosivité et une haute résistance chimique. En plus de leurs propriétés chimiques, les PRF sont beaucoup plus légers que les aciers donc beaucoup plus manipulables sur les chantiers de construction et moins chers à transporter jusqu'aux différents sites. Beaucoup d'avantages sont nommés, mais il existe également des inconvénients à l'utilisation des PRF dans la société actuelle: ils manquent de ductilité et ont une faible résistance face au feu. Quelques chercheurs ont fait des essais de résistance au feu de poutres: deux poutres renforcées avec des PRFV ont résisté entre une minute et une minute trente secondes (A. Abbasi and P.J. Hogg, 2009), ce qui montre la nécessité de prévoir beaucoup d'enrobage dans des situations où un risque d'incendie peut avoir lieu.

Contrairement aux aciers, les PRF n'ont pas de zone plastique et rompent directement dès que la limite élastique est franchie. Afin d'éviter une rupture directe des PRF dans une structure, la plupart des guides actuels recommandent fortement de dimensionner de façon à avoir une rupture en compression (ACI 440.1R-15).

2.3 L'adhérence des barres en PRF dans le béton

Les sections qui suivent porteront sur l'étude du comportement de l'adhérence des barres d'armature en PRF dans le béton dans la littérature et les méthodes de dimensionnement grâce aux normes. L'adhérence est un paramètre à prendre en compte pour le calcul des largeurs de fissures. En fait, les calculs dépendent d'un coefficient d'adhérence k_b qui a des valeurs différentes selon les codes. La disparité existante du coefficient k_b est due au manque de corrélation entre le comportement actuel des fissures et de la forme mathématique usuelle.

2.3.1 Les effets impactant l'adhérence des barres en PRF

L'étude de l'adhérence des barres a déjà fait l'objet de recherches (El-Nemr, A., Ahmed, E. A., Benmokrane, B., 2013) et d'autres sont à réaliser pour en connaître davantage sur le comportement des barres en PRF avec le béton. L'adhérence entre les barres en PRF et le béton dépend de plusieurs paramètres à prendre en considération. Ces paramètres sont détaillés dans les sections suivantes.

2.3.1.1 Résistance de compression du béton

Cela a été prouvé que la résistance en traction du béton est approximativement proportionnelle à la racine carrée de la résistance en compression du béton $\sqrt{f'_c}$ (ACI Committee 408, 1992). Ainsi, la force d'adhérence doit être également liée à $\sqrt{f'_c}$. Différentes recherches menées auparavant ont prouvé qu'une meilleure corrélation existe entre la force d'adhérence et $\sqrt{f'_c}$ en ce qui concerne la rupture d'adhérence des barres en PRF dans le béton (Pleimann, 1991 ; Okelo et Yuan, 2005). Des observations ont également été faites concernant la performance de l'adhérence de barres d'armature en PRFA et ces tests ont montré que la contrainte d'adhérence

maximum dépend de la résistance de compression du béton (Hattori et al., 1995). La résistance en compression du béton est liée à l'adhérence entre les barres d'armatures en PRF et le béton. Benmokrane et al. (1996) ont notamment étudié le comportement de l'adhérence sous l'effet de la résistance en compression du béton en réalisant des poutres renforcées de barres d'armature en PRFV. En conclusion, la force d'adhérence est proportionnelle à $\sqrt{f'_c}$ donc elle est liée à celle-ci.

2.3.1.2 Diamètre des barres

L'effet du diamètre des barres sur l'adhérence des barres en PRF est important et a fait l'objet de plusieurs recherches, notamment celle de Benmokrane et al. (1996). Cette étude a prouvé que l'effet du diamètre des barres sur l'adhérence qui est présent pour le renforcement de barres d'armature en acier, est également présent pour le renforcement de barres d'armature en PRF. La force d'adhérence des PRFV est cependant plus basse de 60 à 90% que celle des aciers. Une autre remarque importante à propos de l'influence du diamètre des barres sur l'adhérence est que plus le diamètre est important, moins l'adhérence des barres en PRF est élevée. En fait, cela a été montré par Tighiouart et al (2008).

2.3.1.3 Recouvrement du béton

Le recouvrement du béton a également un effet important sur l'adhérence des barres en PRF. Il assure le confinement du béton tout en ayant un effet sur le mode de rupture de la structure. Lorsque ce recouvrement de béton n'est pas assez élevé ou mal calculé, une rupture par fractionnement du béton apparaît mais celle-ci n'apparaît pas lorsque le recouvrement du béton est bien pris en compte. De plus, l'épaisseur de recouvrement du béton a une grande influence sur la résistance au cisaillement que ce soit pour n'importe quel diamètre de barres d'armature en PRF (Kotynia, R., Szczech, D., Kaszubska, M., 2017). Une autre étude a montré qu'avec un recouvrement de béton compris entre une fois et quatre fois le diamètre de la barre, la force d'adhérence augmentait jusqu'à 27% lorsque le recouvrement de béton atteignait quatre fois le diamètre de la barre (Aly, R., Benmokrane, B., Ebead, U, 2006).

2.3.1.4 Longueur d'ancrage

De nombreuses recherches ont été effectuées à propos de l'effet de la longueur d'ancrage sur la contrainte d'adhérence maximale de barres en PRF. Il a été montré que plus le diamètre des barres d'armature en PRF augmente, moins la force d'adhérence de barres d'armature ancrées est élevée (Hossain et al., 2004 ; Hao et al., 2009). De façon plus générale, la force d'adhérence baisse lorsque la longueur d'ancrage des barres d'armature en PRF augmente. Une étude a été menée sur des barres d'armature en PRFV et PRFC permettant de montrer que si la longueur d'ancrage, le diamètre de la barre ainsi que la résistance du béton sont bas, alors l'arrachement de la barre du bloc en béton se fera assez facilement (Achillides et Pilakoutas, 2004). Cela n'arrivera pas si ces trois paramètres sont élevés : il y aura rupture de la barre ou du béton. De plus, afin d'évaluer efficacement la contrainte d'adhérence, certaines études ont montré que les barres en PRF doivent avoir une longueur d'ancrage de $5d_b$ (Ahmed, E., El-Salakawy, E., Benmokrane, B., 2008).

2.3.1.5 Type de surface

Le type de surface des barres d'armature en PRF est variable selon le constructeur et peut être de différents types :

- Nervurées ou rainurées ;
- Rainurées de manière hélicoïdale ;
- Enrobées de sable ;
- Revêtues de sable et en spirale ;
- Sablées, déformées ;
- Etc.

Ces barres ont des effets différents sur l'adhérence et notamment sur sa performance selon le type de surface des barres d'armature en PRF. Par exemple, des barres en PRFV avec une surface nervurée ou rainurée obtiennent une contrainte d'adhérence maximale supérieure à des barres en PRFV avec une surface enrobée de sable en tenant compte de la longueur d'ancrage des barres et du recouvrement du béton (Mazaheripour, H., Barros, J. A. O., Sena-

Cruz, J.M., Pepe, M., Martinelli, E., 2013). D'autres paramètres varient avec le type de surface défini pour effectuer certains tests. Ces différences obtenues entre les deux types de surface de ces barres en PRFV augmentent et sont plus élevées lors de tests d'arrachements sur des blocs en béton avec un plus petit recouvrement en béton (Mazaheripour, H., Barros, J. A. O., Sena-Cruz, J.M., Pepe, M., Martinelli, E., 2013).

2.3.2 Calcul des propriétés des barres en PRF selon la norme CSA S806-12

Les propriétés des barres en PRF doivent être calculées pour connaître l'état des barres en termes de résistance à la traction, module d'élasticité ou encore l'allongement ultime de ces barres en PRF. Ceci permettra d'introduire le calcul du coefficient d'adhérence k_b que l'on retrouve dans l'ACI (2006) en modifiant les paramètres affectant l'acier par les paramètres des barres en PRF.

Une méthode d'essai des propriétés de traction en PRF est mentionnée par la norme CSA S806-12. La contrainte ultime est déterminée en ayant la charge à la rupture des barres en PRF :

$$\sigma = \frac{P_u}{S} \quad (1)$$

Où

P_u est la charge à la rupture de la barre déterminée lors du test de traction en kN ;

S est l'aire de la barre en mm^2 .

Concernant le module d'élasticité, il se calcule comme suit :

$$E = \frac{1000(P_1 - P_2)}{\frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{l} A} \quad (2)$$

Où

P_1 et ε_1 sont respectivement la charge et déformation correspondante à environ 50 % de la charge de rupture avec P_1 en kN ;

P_2 et ε_2 sont respectivement la charge et déformation correspondante à environ 25 % de la charge de rupture avec P_2 en kN ;

l est la longueur de l'extensomètre.

Le module d'élasticité est en fait fonction de la longueur de l'extensomètre de 20cm de long mis en place qui permet de collecter les données d'allongement sur la longueur de l'extensomètre.

Ensuite, l'allongement ultime des barres en PRF peut être déterminé. Il se calcule de la manière suivante :

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (3)$$

Où

σ est la contrainte ultime calculée à la rupture de la barre en PRF en MPa ;

E est le module d'élasticité trouvé grâce à la formule précédente en MPa ;

2.3.3 Calcul du coefficient d'adhérence selon différentes normes

Le coefficient d'adhérence k_b est requis pour déterminer les largeurs de fissures. Ce sont les limitations à l'état de service qui gouvernent, et le calcul des largeurs de fissures maximales étant le critère le plus restrictif dirigeant le design dans une structure, il est important d'obtenir des valeurs précises des coefficients d'adhérence k_b . Nous allons voir dans une autre section que les coefficients d'adhérence sont déjà donnés dans les normes mais ils ne sont pas assez précis suivant le type de barre utilisé.

2.3.3.1 CSA S806-12

La norme CSA S806-12 mentionne un calcul d'une quantité z en fonction du coefficient d'adhérence k_b . L'équation de la norme CSA S806-12 avec la quantité z est la suivante :

$$z = \frac{E_s}{E_f} k_b f_f^3 \sqrt{d_c A} \quad (4)$$

Où

z est une quantité limitant la distribution des barres d'armature fléchies en PRF

E_f est le module d'élasticité de l'armature en PRF (MPa) ;

E_s est le module d'élasticité de l'armature en acier (MPa)

f_f est la contrainte dans l'armature en PRF en traction (MPa) ;

k_b est le coefficient assujéti aux caractéristiques de liaisonnement ;

d_c est l'épaisseur de l'enrobage de béton mesuré entre la fibre tendue extrême et le centre de la barre en mm ;

A est la zone de l'aire de tension efficace du béton entourant la section de l'armature sollicitée en flexion en mm².

2.3.3.2 ACI 440.1R-15

La norme ACI 440.1R-15 définit une formule permettant de calculer les largeurs de fissure en fonction du coefficient d'adhérence k_b et d'autres paramètres :

$$w = 2 \frac{f_f}{E_f} \beta k_b \sqrt{d_c^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2} \quad (5)$$

Où

w est la largeur maximale de fissure en mm ;

E_f est le module d'élasticité de la barre en PRF (MPa) ;

f_f est la contrainte dans l'armature en PRF en traction (MPa) ;

k_b est le coefficient assujéti aux caractéristiques de liaisonnement ;

β est le rapport de la distance mesurée entre la fibre tendue extrême et l'axe neutre et la distance mesurée entre le centre de tension et l'axe neutre ;

d_c est l'épaisseur de l'enrobage de béton mesuré entre la fibre tendue extrême et le centre de la barre en mm ;

s est l'espacement longitudinal des barres en PRF en mm.

2.3.3.3 CSA S6-14

La norme CSA S6-14 fournit cette équation, qui est la même que celle de l'ACI 440.1R-06

mais avec le coefficient β remplacé par le rapport $\frac{h_2}{h_1}$:

$$w = 2.2 \frac{f_f}{E_f} \frac{h_2}{h_1} \sqrt{d_c^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2} \quad (6)$$

Où

w est la largeur maximale de fissure en mm ;

E_f est le module d'élasticité de la barre en PRF (MPa) ;

f_f est la contrainte dans l'armature en PRF en traction (MPa) ;

k_b est le coefficient assujéti aux caractéristiques de liaisonnement ;

h_1 est la distance de la surface extrême tendue à l'axe neutre en mm ;

h_2 est la distance du centre de gravité de l'armature tendue à l'axe neutre en mm ;

d_c est l'épaisseur de l'enrobage de béton mesuré entre la fibre tendue extrême et le centre de la barre en mm ;

s est l'espacement longitudinal des barres en PRF en mm.

Ces équations permettent de déterminer les coefficients d'adhérence selon le type de barre qui est étudié. C'est la dernière équation qui est utilisée dans ce projet pour calculer les coefficients d'adhérence des barres d'armature en PRFV. Les équations provenant de l'ACI 440.1R-15 et de la norme CSA S6-14 sont toutes deux similaires puisque le coefficient β utilisé dans l'ACI 440.1R-15 est égal au rapport $\frac{h_2}{h_1}$.

2.3.4 Les disparités des coefficients d'adhérence

Des coefficients d'adhérence sont définis actuellement dans les normes. Ces valeurs varient selon les normes. Par exemple, l'ACI 440.1R-15 privilégie une valeur de 1.4 pour le coefficient d'adhérence, la norme CSA S806-12 mentionne une valeur de 1.2 à prendre pour des barres à haute adhérence et la norme CSA S6-14 indique des valeurs à prendre de 0.8 pour des barres avec une surface sablée, et 1.0 pour des barres dont la surface est hélicoïdale. Ce sont des valeurs exactes mais chaque barre a un coefficient d'adhérence différent et il existe une multitude de barres d'armature en PRF. Ainsi, des valeurs conseillées de coefficients d'adhérence pourront être données. Certains coefficients d'adhérence ont déjà été calculés lors de précédentes recherches et ils peuvent varier du simple au double (El-Nemr, A., Ahmed, E. A., Benmokrane, B., 2013). Nous verrons un peu plus en détail les travaux de cette recherche dans une autre

section. Il est donc important d'améliorer les normes afin de pouvoir introduire de nouvelles valeurs.

2.3.5 Calcul des contraintes d'adhérence lors d'essais d'arrachement

La contrainte d'adhérence est un paramètre important à prendre en compte pour ce projet puisque le but est de déterminer si une corrélation entre le coefficient d'adhérence k_b et celle-ci existe. Elle se calcule lors d'essais d'arrachement en sachant que la longueur d'ancrage est égale à $5d_b$ dans notre cas (la méthodologie sera expliquée dans une autre section). La contrainte d'adhérence se calcule de la manière suivante :

$$\tau_{max} = \frac{P_t}{\pi d_b l_b} \quad (7)$$

Où

τ_{max} est la contrainte d'adhérence maximale atteinte de la barre en MPa;

P_t est la charge maximale atteinte lors de l'essai d'arrachement en kN ;

d_b est le diamètre de la barre en mm ;

l_b est la longueur d'ancrage de la barre en mm.

2.3.6 Travaux publiés auparavant

El-Nemr, A., Ahmed, E. A., Benmokrane, B. (2013) ont publié une étude concernant le comportement de la flexion à l'état de service de plusieurs poutres en PRFV. Douze poutres ont été fabriquées avec des barres en PRFV et deux autres poutres avec des barres en acier, celles en acier servant de contrôle. Elles ont été testées avec du béton à haute performance (BHP) et à performance normale. Les poutres avaient comme dimensions 4250 mm de long x 200 mm de large x 400 mm de hauteur et trois produits différents ont été utilisés pour les barres en PRF avec un module d'élasticité variant de 48.7 à 69.0 GPa et des finis de surface sablés et hélicoïdaux. Les poutres avaient une portée de 3750 mm avec et étaient sollicitées en flexion sur quatre points Les paramètres de tests de ces poutres étant : la résistance du béton, l'influence du diamètre des barres et de la surface des barres d'armatures, le type de renforcement et ratio de PRFV. Ces paramètres ont permis d'obtenir plusieurs résultats en termes de flèche, largeurs de fissures, de déformation du béton, de mode de rupture et en flexion. Les résultats ont permis

de constater que les largeurs de fissure étaient notamment affectées par le diamètre des barres, le type de finis de surface alors que la flèche des poutres était beaucoup moins atteinte par ces configurations. Les coefficients d'adhérence ont pu être également calculés et ils ont pu remarquer que la valeur de 1.4 était très conservatrice que ce soit pour des barres sablées ou déformées selon un BHP ou béton à performance moyenne.

Shen D., Ojha B., Shi X., Zhang H. et Shen J. (2016) ont étudié le comportement de barres d'armature en polymères renforcés de fibres de basalte qui sont des nouveaux matériaux en pleine évolution. Ils ont étudié le comportement de l'adhérence entre le béton et les barres d'armature en PRFB avec des barres de diamètres différents et une résistance en béton différente. Ils ont considéré des barres d'armature de diamètres 10 mm, 14 mm et 20 mm avec un BHP et un béton à performance normale en effectuant des tests d'arrachement. Les essais ont mené à plusieurs résultats :

- Le mode de rupture est survenu avec une rupture en compression du béton et de la surface du PRFB ;
- La force d'adhérence entre le béton et les PRFB a diminué à mesure que le diamètre des barres augmentait ;
- Le glissement augmentait avec l'augmentation du diamètre des barres en PRFB ;
- La force d'adhérence entre le béton et les barres en PRFB avec un diamètre de 10 mm a augmenté de 18.8% quand la résistance du béton augmentait de 64.7% ;
- Des formules ont pu être établies menant à une relation entre l'adhérence des PRFB et du béton en considérant le rapport de la hauteur d'enrobage du béton avec la résistance à la compression du béton.

Les résultats qu'ils ont trouvé lors de l'application des formules ont été d'une grande précision par rapport aux tests expérimentaux qu'ils ont effectué.

Une autre étude intéressante a été effectuée par El-Nemr A., Ahmed E. A., Barris C., Benmokrane B. (2016). Le comportement de l'adhérence a été étudié sur des barres en polymères renforcés de fibres de verre et de carbone. Le manque de données sur le coefficient d'adhérence k_b conduit à de nombreuses recherches comme celle-ci sur des barres en PRFV et PRFC avec un BHP et un béton à performance normale. 16 poutres de dimensions 4250 mm de

long x 200 mm de large x 400 mm de hauteur ont été réalisée pour cette étude avec des barres en PRFV sablées et hélicoïdale et des barres en PRFC sablées, les barres ayant des diamètres de 10, 13, 15, 20, 22 et 25mm. La mesure de la première fissure a servi à estimer les coefficients d'adhérence k_b de chaque barre. Les coefficients étant différents dépendamment des finis de surface des barres, du type de barre, etc., d'autres recherches doivent être effectuées afin de fournir tous les paramètres qui en sont affectés.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE

3.1 Introduction

L'objectif de cette recherche est de trouver une corrélation entre les différents coefficients d'adhérence évalués et la force d'adhérence entre le béton et les barres d'armature en polymères renforcés de fibres de verre (PRFV).

Un total de cinquante échantillons a été fabriqué pour qu'ils soient testés en traction. Ceci avait pour objectif d'étudier et connaître les paramètres des barres d'armature en PRFV. Suite à cela, vingt poutres renforcées de barres en PRFV ont été réalisées permettant de calculer le coefficient d'adhérence de ces barres d'armature. Cinquante échantillons ont été fabriqués pour être testés à l'arrachement, ainsi que six prismes pour être testés en traction dans le but de trouver une corrélation entre le coefficient d'adhérence k_b des barres en PRFV et les résultats de ces tests.

3.2 Matériaux

3.2.1 Propriétés du béton

Un type de béton a été utilisé pour fabriquer les poutres. C'est un béton avec une résistance variant entre 42,1 et 49,5 MPa à 28 jours. Cette variation est due au fait que cinq coulées ont été faites puisque le coffrage a été réalisé pour seulement quatre poutres. La résistance à la compression du béton de chaque coulée est obtenue grâce à des essais en compression de cinq cylindres de béton ayant 200 mm de hauteur et 100 mm de diamètre pour chaque coulée.

Les prismes ont été coulés séparément et le béton a une résistance moyenne de 36,1 MPa à 28 jours. Cette résistance à la compression est obtenue également par l'écrasement de cinq cylindres en béton.

3.2.2 Propriétés de l'armature en PRFV

Afin de mener à bien ce projet, plusieurs barres d'armature en PRFV ont été fournies. Ces barres d'armature en PRFV sont des barres V-ROD, Aslan, ComBAR et MSTBAR ayant un diamètre nominal de 15,9 mm, 19 mm et 25,4 mm. Une vue d'ensemble ainsi que des vues rapprochées de ces barres en PRFV sont visibles sur les figures suivantes.

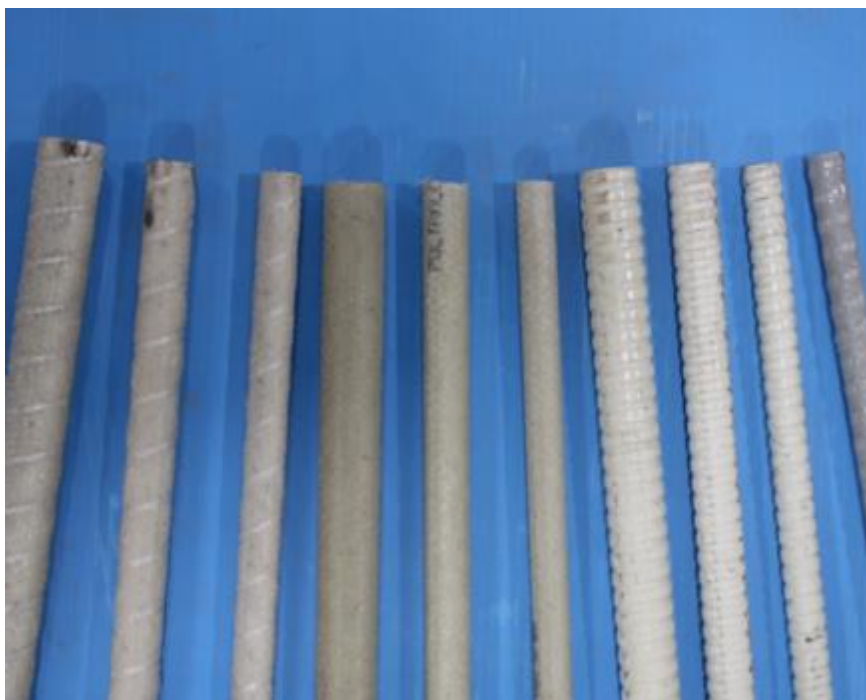


Figure 3.1: Vue d'ensemble des barres d'armature en PRFV



Figure 3.2: Vue rapprochée des barres d'armature V-ROD



Figure 3.3: Vue rapprochée des barres d'armature Aslan



Figure 3.4: Vue rapprochée des barres d'armature ComBAR



Figure 3.5: Vue rapprochée de la barre d'armature MSTBAR

Ces barres d'armature en PRFV sont différentes l'une de l'autre et ont donc des propriétés différentes. Le tableau ci-après présente un résumé des différents produits utilisés ainsi que leurs propriétés.

Matériau	Barres	Diamètre nominal (mm)	Aire nominale (mm ²)	Type de surface	Résistance en traction (MPa)	Module d'élasticité (GPa)
Barres d'armature en PRFV	Aslan	15	199	Hélicoïdal et sablé	724	46
		20	284		690	46
		25	510		620	46
	V-ROD	15	199	Sablé	1263	61.5
		20	284		1273	60.7
		25	510		1263	61.4
	ComBAR	15	199	Rainurée	1000	63.5
		20	284		1000	63.5
		25	510		1000	63.5
	MSTBAR	15	199	Hélicoïdal	1200	60.0

Tableau 3.1: Propriétés des barres d'armature en PRFV

Ces propriétés sont fournies par les manufacturiers ayant fourni les barres d'armature en PRFV. Le diamètre et l'aire exactes de ces barres d'armature en PRFV ont été mesurées grâce à un essai d'immersion sur chaque barre. L'annexe A de la norme CSA S806-12 décrit la méthode à suivre pour déterminer ces valeurs. Le tableau 3.2 résume les valeurs mesurées en les comparant aux aires minimales et maximales préconisées par la CSA S807.

Barres PRFV	Désignation des barres	Diamètre mesuré (mm)	Aire mesurée (mm ²)	Aire minimale (mm ²)	Aire maximale (mm ²)
Aslan	No. 5	17.8	248	186	251
	No. 6	20.6	333	268	347
	No. 8	27.3	587	476	589
V-ROD	No. 5	17.2	233	186	251
	No. 6	20.0	313	268	347
	No. 8	27.0	575	476	589
ComBAR	No. 5	17.4	237	186	251
	No. 6	21.4	361	268	347
	No. 8	26.3	545	476	589
MSTBAR	No. 5	17.9	251	186	251

Tableau 3.2: Diamètres et aires des barres d'armature en PRFV mesurées expérimentalement

Seule l'aire mesurée des barres d'armature en PRFV No. 6 est supérieure à l'aire maximale préconisée par la norme CSA S807. L'aire mesurée de toutes les autres barres sont bien comprises entre l'aire minimale et l'aire maximale préconisée par la norme CSA S807.

3.3 Essais de traction

3.3.1 Paramètres étudiés

Les essais de traction sont effectués afin de déterminer les propriétés exactes des barres d'armature. Les différents manufacturiers ont fourni certaines propriétés mais elles doivent être calculées de manière exacte. Dans notre cas, il s'agit de déterminer ces propriétés pour chaque

barre afin de pouvoir évaluer et calculer plus précisément les coefficients d'adhérence des barres d'armature en PRFV.

3.3.2 Préparation des échantillons

3.3.2.1 Méthode expérimentale

Cinquante échantillons ont été fabriqués au total. Ils doivent être préparés pour être testés sachant que 5 échantillons sont préparés et testés pour chaque diamètre : la norme CSA S806-12 (annexe C) spécifie qu'au moins cinq éprouvettes doivent être mises à l'essai. Ils doivent être testés sur un appareil étant conforme à l'ASTM E4. Les longueurs des barres à tester sont règlementées et dimensionnées à l'aide de la norme CSA S806-12 (annexe C). L'annexe C de la norme CSA S806-12 mentionne une longueur totale des éprouvettes étant égale au minimum à $40d_b + L_g$, L_g étant la longueur de serrage et d_b le diamètre des barres. La norme ASTM D7205 / D7205M-06 recommande certaines dimensions de tubes en acier qui serviront au serrage des barres et ces dimensions sont à choisir en fonction du diamètre des barres en PRFV. En effet, chaque extrémité des barres doit comporter un tube en acier pour permettre le serrage des tubes lors de l'essai sans endommager les barres d'armature en PRF. Ces dimensions sont résumées dans le tableau ci-après.

FRP bar type	Diameter of the FRP bar, d	Outside diameter of the steel tube	Minimal length of the steel tube, L_g
GFRP	6.4 mm [0.25 in.]	35 mm [1.38 in.]	300 mm [12 in.]
GFRP	9.5 mm [0.38 in.]	35 mm [1.38 in.]	300 mm [12 in.]
GFRP	13 mm [0.50 in.]	42 mm [1.63 in.]	380 mm [15 in.]
GFRP	16 mm [0.63 in.]	42 mm [1.63 in.]	380 mm [15 in.]
GFRP	19 mm [0.75 in.]	48 mm [1.88 in.]	460 mm [18 in.]
GFRP	22 mm [0.88 in.]	48 mm [1.88 in.]	460 mm [18 in.]
GFRP	25 mm [1.00 in.]	48 mm [1.88 in.]	460 mm [18 in.]
GFRP	29 mm [1.13 in.]	48 mm [1.88 in.]	460 mm [18 in.]
GFRP	32 mm [1.25 in.]	75 mm [2.95 in.]	800 mm [32 in.]
CFRP	9.5 mm [0.38 in.]	35 mm [1.38 in.]	460 mm [18 in.]

Tableau 3.3 : Longueurs minimales recommandées pour les tubes en acier

3.3.2.2 Pratique expérimentale

Les longueurs des échantillons et des tubes en acier ayant été déterminées, elles sont résumées dans le tableau qui suit.

Barres PRFV	Diamètre nominal (mm)	Longueur L_g (mm)	Longueur des barres en PRF (mm)
Aslan	15	630	1900
	20	630	2340
	25	770	2540
V-ROD	15	630	1900
	20	630	2340
	25	770	2540
ComBAR	15	630	1900
	20	630	2340
	25	770	2540
MSTBAR	15	630	1900

Tableau 3.4 : Résumé des longueurs L_g et des barres en PRFV pour les essais de traction

La préparation des barres d'armature en PRFV pour les essais de traction a été faite en installant des tubes en acier de chaque côté des barres en y incorporant du coulis de ciment.



Figure 3.6: Préparation des barres d'armature en PRF pour les essais de traction

Une fois les barres préparées, elles peuvent être mises en place et testées sur l'appareillage spécifié pour cela. Mais avant d'effectuer les tests et d'enregistrer les données, un extensomètre d'une longueur de 100mm doit être installé au milieu de la barre (voir figure 3.7 pour le gabarit) pour enregistrer la déformation de la barre en PRFV. Cet extensomètre (voir figure 3.8) sera enlevé à environ 75% de la charge à la rupture de la barre en PRFV pour éviter qu'il soit endommagé selon la norme CSA S806-12 (annexe C).



Figure 3.7: Gabarit utilisé pour placer l'extensomètre



Figure 3.8: Appareillage utilisé et extensomètre mis en place

Ces barres d'armature en PRFV étant mises à l'épreuve lors d'essais en traction, les résultats obtenus seront détaillés dans un autre chapitre.

3.4 Essais de flexion

Ce sont les essais de flexion qui permettront de déterminer les coefficients d'adhérence k_b de chaque barre d'armature en PRFV. Dans cette section seront mis en avant : une description des cages d'armature, une méthode mentionnée par la norme CSA S806-12 pour tester les poutres, une brève explication de la résistance en béton obtenue lors du coulage des poutres, et la pratique effectuée au laboratoire pour couler les poutres et les tester.

3.4.1 Paramètres étudiés

Des poutres renforcées avec des barres d'armature en PRFV sont réalisées afin d'obtenir plusieurs résultats : la visualisation du mode de rupture des poutres, la flèche de chaque poutre, et le coefficient d'adhérence des barres d'armature en PRFV.

3.4.2 Détail des poutres

Vingt poutres ont été réalisées et testées. Elles ont été testées en flexion sous l'effet de deux charges verticales distantes de 1000 mm. La longueur des poutres est de 4250mm avec une section de 200 mm de largeur et 400 mm de hauteur. Les poutres sont toutes renforcées de la même manière : deux barres d'armature longitudinales en PRFV dans le bas des poutres dont les diamètres nominaux sont 15mm, 20mm et 15mm, deux barres en acier M10 dans le haut des poutres avec des étriers en acier M10 espacés de 100mm, sauf pour le milieu (le détail des cages d'armature des poutres est spécifié dans la figure 3.9 ci-après et 3.10). Les dimensions de ces poutres ainsi que les armatures sont similaires à la recherche qui a été faite par El-Nemr A., Ahmed E. A., Barris C., Benmokrane B. (2016) pour l'étude de l'adhérence de barres en PRFV et PRFC. Pour ce qui est de l'instrumentation des barres d'armature en PRFV, trois jauges de déformations sont installées sur une seule des deux barres d'armature en PRFV comme spécifié sur la figure 3.9. Une jauge de déformation est placée au milieu de la barre et les deux autres jauges de déformation sont distantes de 500mm de celle-ci. Une jauge de déformation est présentée en détail sur la figure 3.7.

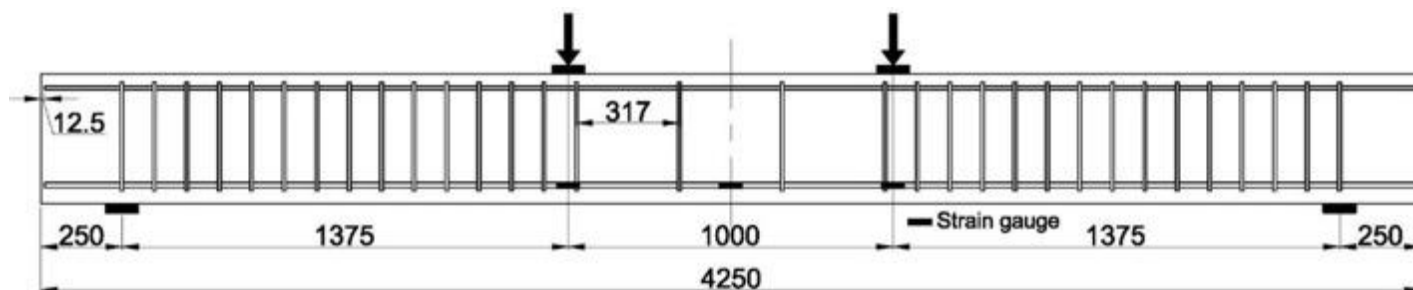


Figure 3.9: Détail des poutres testées

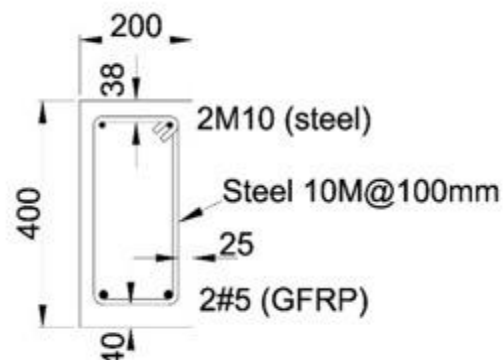


Figure 3.10: Détail des cages d'armature pour des barres en PRFV de diamètre 15mm



Figure 3.11: Jauge de déformation

Pour étudier les poutres en flexion, les poutres ont été réalisées comme décrit ci-dessus. La figure 3.12 montre quatre cages d'armature réalisées (barres d'armature en PRFV V-ROD No.5 et No.6).



Figure 3.12: Quatre cages d'armature faites avec des barres V-ROD de diamètres nominaux 15 mm et 20 mm

3.4.3 Programme expérimental

3.4.3.1 Description des essais de flexion selon la norme CSA S806-12

Ces poutres ont été réalisées conformément à l'annexe S de la norme CSA S806-12. Cette norme mentionne les différentes exigences nécessaires à la bonne réalisation des poutres dans le but de déterminer précisément les coefficients d'adhérence des barres en PRFV (pour notre cas). Ce mode opératoire d'essai est basé sur l'essai d'une poutre chargée à deux endroits. L'installation d'essai et les exigences relatives aux armatures sont montrées sur les figures 3.13 et 3.14 respectivement.

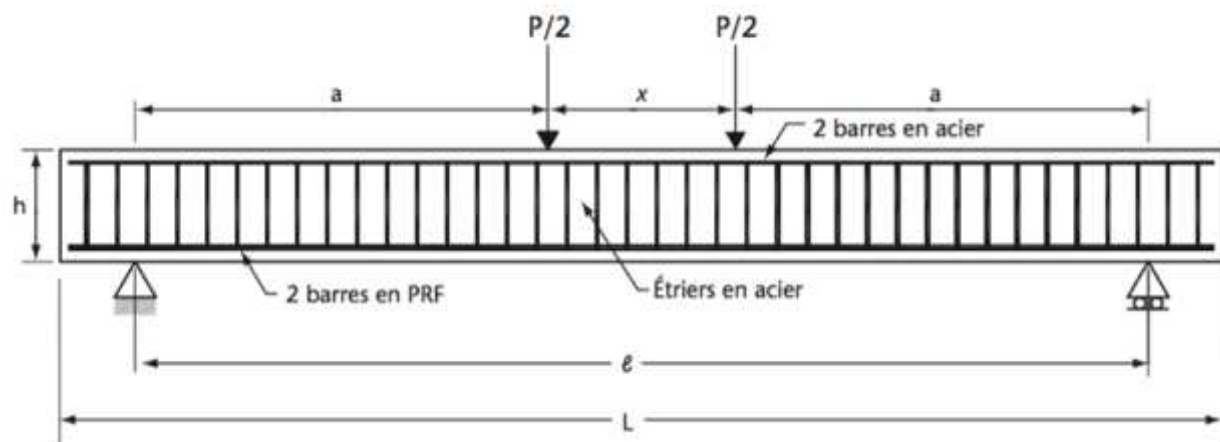


Figure 3.13: Dimensions recommandées d'une poutre selon la norme CSA S806-12

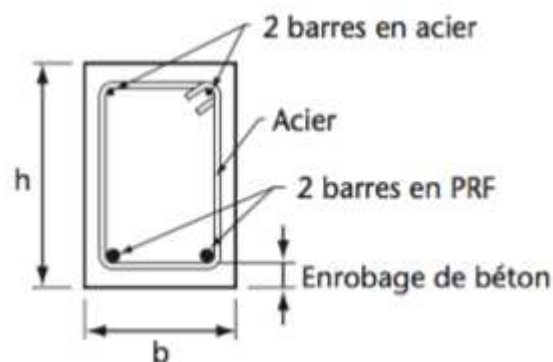


Figure 3.14: Armatures recommandées selon la norme CSA S806-12

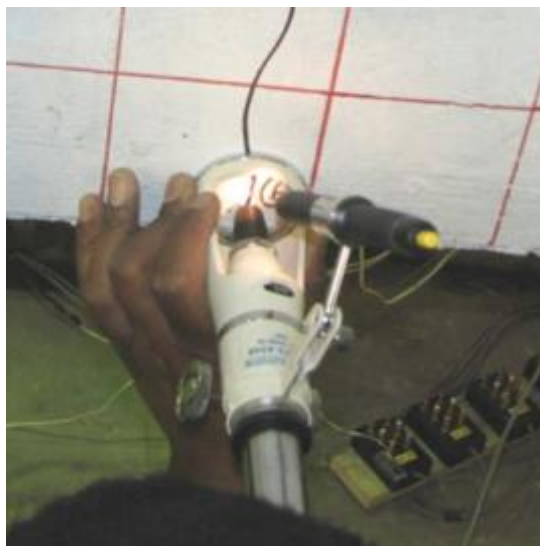


Figure 3.15: Mesure d'une largeur de fissure avec un microscope

Deux poutres par diamètre de barres d'armature en PRFV ont été coulées et testées afin d'obtenir des résultats cohérents pour les coefficients d'adhérence k_b . Cela est également recommandé par la norme CSA S806-12 (annexe S). Afin d'obtenir les résultats souhaités, les essais doivent être réalisés de la manière suivante : la charge doit être appliquée sur la poutre jusqu'à l'apparition de la première fissure. Dès que la première fissure est visible, l'application de la charge doit être stoppée. Ceci permet de mesurer la largeur de fissure initiale avec un appareil de mesure adéquat : un microscope (voir figure 3.15) sachant que la largeur de fissure initiale doit être mesurée à la hauteur où les barres ont été installées dans les poutres pour avoir des résultats précis. La norme CSA S806-12 recommande de répéter cette action sur une deuxième fissure seulement mais pour notre cas, nous avons mesurer les trois premières fissures apparentes pour obtenir le plus de données possibles en cas de problème. Le but est de mesurer ces largeurs de fissure sur la totalité de l'essai.

Pour mesurer les largeurs de fissure sur la totalité de l'essai, des instruments de mesure sont mis en place. Ce sont des capteurs linéaires à transformateur différentiel variable (LVDT : Linear Variable Differential Transformer). Ils sont installés à l'endroit où la mesure de la largeur de fissure initiale a été prise (figure 3.16).

Nota: La largeur de fissure, pour le calcul du coefficient k_b , ne doit pas dépasser 0.70mm selon la norme CSA S806-12.



Figure 3.16: Mise en place d'un LVDT

La poutre peut continuer à être soumise à la charge appliquée une fois que les trois LVDT sont placés. Elle sera soumise à l'application de la charge jusqu'à la rupture de la poutre. Ce sont les principales méthodes utilisées dans ce projet pour déterminer par la suite les coefficients d'adhérence k_b des barres d'armature en PRFV.

3.4.3.2 Pratique expérimentale

Dans cette partie, les différentes étapes réalisées au laboratoire pour tester les poutres et calculer les coefficients d'adhérence k_b de chaque barre seront expliquées. Pour commencer, le coffrage pour quatre poutres a été réalisé ainsi que quatre cages d'armature par coulée.



Figure 3.17: Fabrication du coffrage des poutres

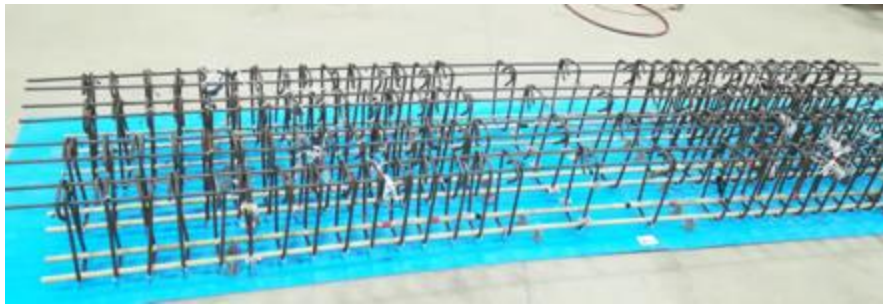


Figure 3.18: Vue d'ensemble de quatre cages d'armature

Les cages d'armature ont ensuite été placées dans le coffrage et un peu de préparation a été effectuée pour permettre le coulage des poutres sans rencontrer de difficultés.



Figure 3.19: Détail du coffrage avec les cages d'armature



Figure 3.20: Vue d'ensemble du coffrage avec les cages d'armature

Les poutres sont ainsi prêtes à être coulées. Cinq coulages auront été effectués pour avoir les vingt poutres.



Figure 3.21: Coulage des poutres



Figure 3.22: Poutre coulées

Une fois les poutres coulées, il a fallu attendre 28 jours pour que le béton atteigne sa résistance maximale et tester les poutres. Elles ont été mises en place sur le banc d'essai suivant :

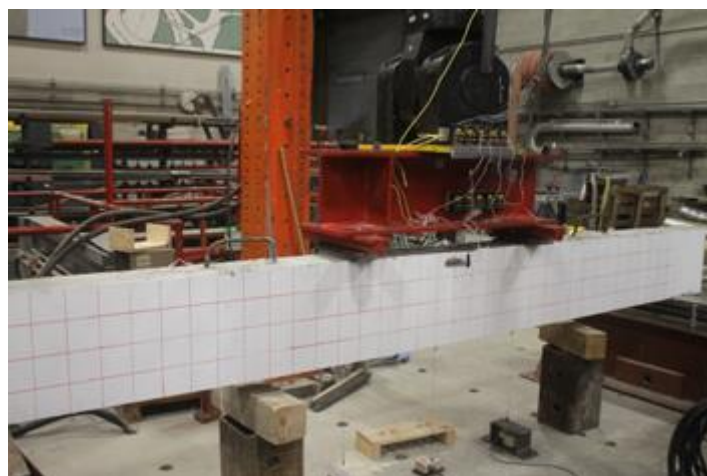


Figure 3.23: Poutre mise en place pour un essai en flexion

Chaque poutre doit être préparée avant l'essai. L'instrumentation de ces poutres doit être réalisée avant la phase d'essai et elle est relativement simple : deux jauges de déformation sont mises en place directement sur le béton (centrée sur le dessus de la poutre, et l'autre sur la face avant à 50 mm du haut de la poutre comme on peut le voir sur les figures 3.24 et 3.25), trois potentiomètres sont implantés sous la poutre (un au milieu et les deux autres sous les charges) pour permettre d'observer la flèche des poutres sous l'effet des deux charges.



Figure 3.24: Jauge de déformation sur le béton



Figure 3.25: Visualisation d'un potentiomètre

L'instrumentation étant réalisée, les poutres sont alors testées jusqu'à rupture de celles-ci. Les résultats obtenus lors des essais seront détaillés dans un autre chapitre.

3.5 Essais d'arrachement

Dans cette partie sera décrite la méthodologie pour permettre de réaliser les essais d'arrachement. Ils permettront notamment d'étudier le comportement de l'adhérence entre le béton et les barres d'armature en PRFV et une corrélation sera cherchée entre la force d'adhérence et les coefficients d'adhérence calculés après avoir testé les poutres.

3.5.1 Paramètres étudiés

De nombreux paramètres affectant le comportement de l'adhérence de barres d'armature en PRFV entrent en jeu. Certains de ces paramètres sont la longueur d'ancrage, le diamètre des barres, le type de surface des barres, etc.

3.5.2 Préparation des échantillons

3.5.2.1 Méthode expérimentale

Cinquante échantillons au total ont été réalisés. Comme pour la préparation des échantillons pour les essais de traction, 5 échantillons ont été préparés et testés pour chaque diamètre afin d'avoir des résultats cohérents et précis. Les barres ont une longueur totale de : $L_g + 850$ mm. Ceci implique que pour des barres de diamètre nominal 15 mm et 20 mm, la longueur totale des barres est de 1480mm et pour des barres de diamètre nominal 25 mm, la longueur totale est 1620 mm, dépendamment de la longueur des tubes en acier L_g qui est de 630 mm pour des barres de diamètre 15 mm et 200 mm, et 770 mm pour des barres de diamètre 25 mm. Ces tubes en acier sont mis en place juste à une extrémité de la barre pour effectuer l'essai d'arrachement, et comme pour les essais de traction, ces tubes en acier sont mis pour éviter d'endommager les barres en PRFV lors des essais d'arrachement. Concernant l'adhérence de la barre sur le béton, seulement $5d_b$ seront concernés.

C'est-à-dire que pour des barres de diamètre nominal 15 mm, 20 mm et 25 mm, l'adhérence entre les barres et le béton sera d'une longueur de 75 mm, 100 mm et 125 mm respectivement. Les figures 3.26 et 3.27 illustrent bien ce propos.



Figure 3.26: Longueur d'adhérence d'une barre ComBAR



Figure 3.27: Longueur d'adhérence de barres MSTBAR

La longueur de la barre qui n'est pas liée au béton est isolée avec du ruban adhésif comme montré sur la figure 3.27. Les barres sont ainsi de différentes longueurs et possèdent différentes longueurs d'adhérence en ce qui concerne la préparation des échantillons. C'est également différent pour les blocs en béton utilisés. Les dimensions des blocs en béton varient suivant le diamètre de barre utilisé. Ils seront de dimensions 200 mm x 200 mm pour des barres de diamètre nominal 15 mm et ils seront de dimensions 300 mm x 300 mm pour des barres de diamètre nominal 20 et 25 mm.

3.5.2.2 Pratique expérimentale

Les échantillons ont été préparés au laboratoire avec les configurations mentionnées précédemment. Le coffrage a dû être réalisé pour permettre d'obtenir les cinquante échantillons souhaités. Certaines photos illustrent la préparation de ces échantillons et le coulage de ceux-ci.



Figure 3.28: Préparation de barres No. 5 pour les essais d'arrachement



Figure 3.29: Préparation de barres No. 8 pour les essais d'arrachement



Figure 3.30: Coulage des échantillons pour les essais d'arrachement

La phase d'essais s'en suit et elle est effectuée sur le même appareil où les essais en traction des barres ont été effectués. Une préparation doit être faite avant le début des essais. L'échantillon est placé en haut de l'appareil (voir figure 3.31) et le glissement de la barre est

observé et enregistré grâce à un LVDT placé au bout du bloc en béton pour mesurer le glissement de la barre dans le béton comme le montre la figure 3.32.



Figure 3.31: Échantillon prêt à l'essai à l'arrachement



Figure 3.32: LVDT pour mesurer le glissement de la barre

Les données sont ensuite enregistrées pour calculer les différentes forces d'adhérence des barres d'armature en PRFV et visualiser le glissement des barres en fonction de la force appliquée. Les résultats seront explicités dans un autre chapitre.

3.6 Essais des prismes

Les prismes seront testés afin de comparer les résultats trouvés lors de ces tests avec les résultats essais de flexion effectués sur les poutres. Ceci permettra de voir s'il y a une corrélation possible entre les résultats des deux tests.

3.6.1 Paramètres de tests

Les paramètres de tests sont multiples. Ils incluent les différents types de surface des barres comme les surface hélicoïdales, rainurées, sablées ou hélicoïdales et sablées. Le ratio de renforcement en fait également partie.

3.6.2 Détail des échantillons

Six prismes ont été préparés et coulés en une seule fois. Ils sont restés dans un bon environnement leur permettant d'atteindre la résistance maximale de béton à 28 jours. Avant d'être coulés et testés, des tubes en acier ont été mis en place de chaque côté des barres d'armature en PRFV pour permettre de les tester en tension par la suite. La figure 3.33 illustre la préparation des prismes avant le coulage du béton.



Figure 3.33: Coffrage et préparation des prismes

Les dimensions de ces prismes sont 120 mm x 120 mm x 1000 mm de long. Trois barres de diamètre nominal 15 mm et trois barres de diamètre nominal 20 mm ont été utilisées. Le détail de ces échantillons avec le ratio de renforcement qui est compris entre 1.27% et 1.82% est résumé dans le tableau ci-après.

Désignation des échantillons	Ratio de renforcement (%)	Surface nominale des barres (mm ²)
PR-A5	1.27	199
PR-P5	1.27	199
PR-C5	1.27	199
PR-A6	1.82	284
PR-P6	1.82	284
PR-C6	1.82	284

Tableau 3.5 : Détail des propriétés des prismes

Nota : PR fait référence à Prismes, A à Aslan, P à Pultrall (manufacturier des barres d'armature V-ROD), C à ComBAR, et 5, 6 représentent les barres en PRFV No.5 et No. 6 (diamètre nominal 15 mm et 20 mm respectivement)

Les échantillons préparés ont été coulés au laboratoire CME de l'Université de Sherbrooke comme le montrent les photos suivantes. La figure 3.34 montre la réalisation de ces échantillons après coulage du béton.



Figure 3.34: Prismes après coulage du béton

3.6.3 Préparation et instrumentation des prismes

Deux jauges de déformation ont été installées sur les barres en PRFV. Elles permettent d'enregistrer la déformation des barres lors des essais. Trois LVDTs sont également mis en place pour mesurer les trois premières largeurs de fissure lors de la phase de test de chaque prisme. Enfin, des potentiomètres sont installés avant chaque phase de test pour mesurer l'élongation des prismes en traction. La figure 3.35 montre l'instrumentation des prismes. Les deux potentiomètres sont placés de chaque côté des prismes, trois LVDTs sont installés lors de l'apparition des fissures et les deux jauges de déformation sont installées à un tiers et deux tiers de la longueur des prismes.

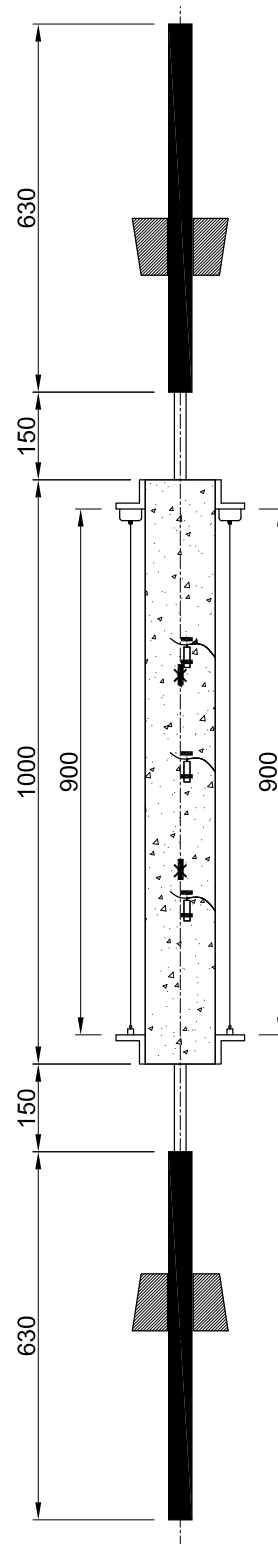


Figure 3.35: Détail de l'instrumentation des prismes

3.6.4 Description des essais

Les essais des prismes ont été réalisés par traction. Lors de la phase d'essai, le chargement a été effectué en déplacement contrôlé. En effet, différents taux de déplacements ont été fixés pendant les tests. Trois taux de charge ont été utilisés : 0.005mm/s jusqu'à une élongation de 3.5mm des prismes, 0.002mm/s jusqu'à une élongation de 15mm et 0.03 jusqu'à la rupture. Une fois les premières fissures apparues, les LVDTs ont été installés pour permettre l'enregistrement des largeurs de fissure sur l'ensemble du test. La figure 3.36 montre une vue d'ensemble d'un prisme mis en place avant l'essai.



Figure 3.36: Vue d'ensemble d'un prisme avant essai

CHAPITRE 4 ESSAIS DE TRACTION

Ce chapitre concerne les essais en traction des barres d'armatures en PRFV. Nous allons voir différentes propriétés des barres d'armatures en PRFV calculées pour chaque diamètre. Comme mentionné auparavant, les essais ont été effectués sur des barres en PRFV V-ROD, Aslan, MSTBAR et ComBAR. Les propriétés de chaque barre sont résumées dans les tableaux ci-dessous et une moyenne de ces propriétés est résumée pour chaque diamètre à la fin de ce chapitre. Nous pourrions voir également les photos prises avant et après chaque essai de chaque barre.

4.1 Barres d'armature ComBAR

Dans cette partie nous allons voir les différents essais effectués sur des barres d'armature en PRFV ComBAR.

4.1.1 Barres d'armature ComBAR No. 5

Spécimen	Aire nominale (mm ²)	Force ultime (kN)	Contrainte ultime (MPa)	Module d'élasticité (GPa)	Déformation ultime (%)
1	199	318,5	1601	72,83	2,19
2	199	306	1538	69,24	2,22
3	199	310,78	1562	71,25	2,19
4	199	326,22	1639	67,19	2,44
5	199	301,68	1516	67,26	2,25
Moyenne		312,64	1571	69,55	2,26
SD		9,83	49,40	2,48	0
COV (%)		3,15	3,14	3,6	4,6

Tableau 4.1 : Propriétés en traction des barres ComBAR No. 5



Figure 4.1 : Barres d'armature ComBAR No. 5 avant rupture



Figure 4.2 : Barres d'armature ComBAR No. 5 après rupture

4.1.2 Barres d'armature ComBAR No. 6

Spécimen	Aire nominale (mm ²)	Force ultime (kN)	Contrainte ultime (MPa)	Module d'élasticité (GPa)	Déformation ultime (%)
1	284	465,1	1638	79,90	2,05
2	284	448,2	1578	78,36	2,01
3	284	462,6	1629	76,12	2,14
4	284	462,56	1629	77,82	2,09
5	284	444,25	1564	80,26	1,95
Moyenne		456,54	1608	78,49	2,05
SD		9,58	33,72	1,67	0
COV (%)		2,1	2,1	2,1	3,57

Tableau 4.2 : Propriétés en traction des barres ComBAR No. 6



Figure 4.3 : Barres d'armature ComBAR No. 6 en PRFV avant rupture



Figure 4.4 : Barres d'armature ComBAR No. 6 après rupture

4.1.3 Barres d'armature ComBAR No. 8

Spécimen	Aire nominale (mm ²)	Force ultime (kN)	Contrainte ultime (MPa)	Module d'élasticité (GPa)	Déformation ultime (%)
1	510	538,97	1057	69,46	1,52
2	510	550,71	1080	69,92	1,54
3	510	546,77	1072	69,73	1,54
4	510	560,83	1100	68,33	1,61
5	510	545,85	1070	69,20	1,55
Moyenne		548,63	1005	69,33	1,55
SD		8,02	15,73	0,62	0
COV (%)		1,46	1,46	0,89	2,16

Tableau 4.3 : Propriétés en traction des barres ComBAR No. 8



Figure 4.5 : Barres d'armature ComBAR No. 8 avant rupture



Figure 4.6 : Barres d'armature ComBAR No. 8 après rupture

4.2 Barres d'armature V-ROD

Dans cette partie nous allons voir les différents essais effectués sur des barres d'armatures en PRFV V-ROD.

4.2.1 Barres d'armature V-ROD No. 5

Spécimen	Aire nominale (mm ²)	Force ultime (kN)	Contrainte ultime (MPa)	Module d'élasticité (GPa)	Déformation ultime (%)
1	199	333,42	1675	71,38	2,35
2	199	338,4	1701	70,48	2,41
3	199	325,4	1635	71,14	2,30
4	199	311,05	1563	70,82	2,21
5	199	322,35	1620	71,21	2,27
Moyenne		326,13	1639	71,01	2,31
SD		10,55	53,0	0,36	0
COV (%)		3,23	3,23	0.5	3,34

Tableau 4.4 : Propriétés en traction des barres V-ROD No. 5



Figure 4.7 : Barres d'armature V-ROD No. 5 avant rupture



Figure 4.8 : Vue rapprochée de trois barres d'armature V-ROD No.5 avant rupture



Figure 4.9 : Barres d'armature V-ROD No. 5 après rupture

4.2.2 Barres d'armature V-ROD No. 6

Spécimen	Aire nominale (mm ²)	Force ultime (kN)	Contrainte ultime (MPa)	Module d'élasticité (GPa)	Déformation ultime (%)
1	284	432,1	1521	72,70	2,09
2	284	415,3	1462	70,33	2,08
3	284	423,56	1491	71,41	2,09
4	284	426,8	1503	71,65	2,10
5	284	442,3	1557	72,27	2,16
Moyenne		428.01	1507	71,67	2,10
SD		10,05	35	0,90	0
COV (%)		2,35	2,35	1,26	1,43

Tableau 4.5 : Propriétés en traction des barres V-ROD No. 6



Figure 4.10 : Barres d'armature V-ROD No. 6 avant rupture

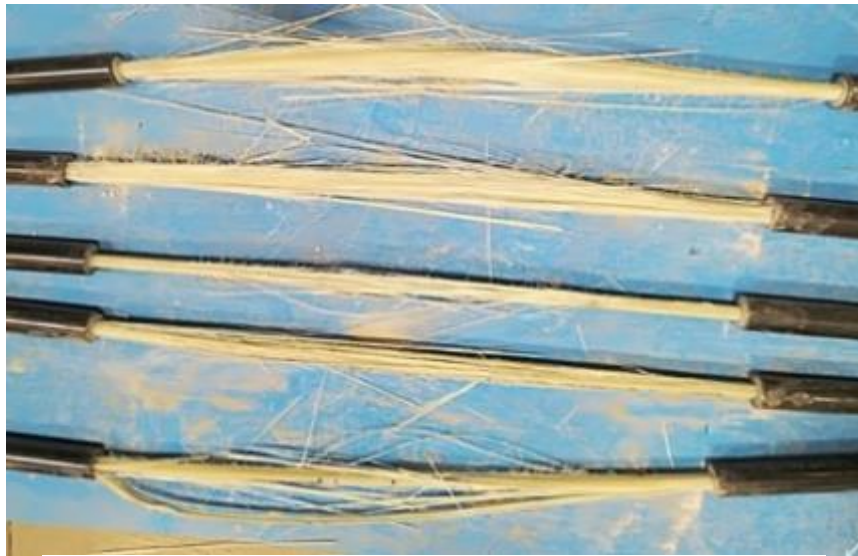


Figure 4.11 : Barres d'armature V-ROD No. 6 après rupture

4.2.3 Barres d'armature V-ROD No. 8

Spécimen	Force ultime (kN)	Contrainte ultime (MPa)	Module d'élasticité (GPa)	Déformation ultime (%)
1	552.26	1083	70,82	1,53
2	583.32	1144	69,74	1,64
3	552.63	1084	68,71	1,58
4	555.92	1090	69,45	1,57
5	556.87	1092	69,31	1,58
Moyenne	560,20	1098	69.60	1,58
SD	13,08	25,64	0.77	0
COV (%)	2,33	2,33	1,1	2,52

Tableau 4.6 : Propriétés en traction des barres d'armature V-ROD No. 8



Figure 4.12 : Barres d'armature V-ROD No. 8 avant rupture



Figure 4.13 : Barres d'armature V-ROD No. 8 après rupture

4.3 Barres d'armature Aslan

Dans cette partie nous allons voir les différents essais effectués sur des barres d'armature en PRFV Aslan.

4.3.1 Barres d'armature Aslan No. 5

Spécimen	Aire nominale (mm ²)	Force ultime (kN)	Contrainte ultime (MPa)	Module d'élasticité (GPa)	Déformation ultime (%)
1	199	244	1226	54,7	2,24
2	199	245	1231	54,9	2,24
3	199	239	1201	54,4	2,21
4	199	/	/	/	/
5	199	243	1221	54,9	2,22
Moyenne		242,75	1220	54,7	2,23
SD		2,63	12,22	0,24	0
COV (%)		1,35	1,08	0,44	0,98

Tableau 4.7 : Propriétés en traction des barres d'armature Aslan No. 5



Figure 4.14 : Barres d'armature Aslan No. 5 avant rupture



Figure 4.15 : Vue rapprochée de deux barres d'armature Aslan No. 5 avant rupture



Figure 4.16 : Barres d'armature Aslan No.5 après rupture

4.3.2 Barres d'armature Aslan No. 6

Spécimen	Aire nominale (mm ²)	Force ultime (kN)	Contrainte ultime (MPa)	Module d'élasticité (GPa)	Déformation ultime (%)
1	284	326	1148	55,1	2,08
2	284	315	1109	55,25	2,01
3	284	311	1095	55,16	1,99
4	284	312	1099	54,50	2,02
5	284	317	1116	55,88	2,00
Moyenne		316,2	1113	55,18	2,02
SD		5,97	21,03	0,49	0
COV (%)		1,89	1,89	0,89	1,89

Table 4.8 : Propriétés en traction des barres d'armature Aslan No. 6



Figure 4.17 : Barres d'armature Aslan No. 6 avant rupture



Figure 4.18 : Barres d'armature Aslan No. 6 après rupture

4.3.3 Barres d'armature Aslan No. 8

Spécimen	Force ultime (kN)	Contrainte ultime (MPa)	Module d'élasticité (GPa)	Déformation ultime (%)
1	420,6	825	54,64	1,51
2	439,6	862	54,48	1,58
3	432,15	847	54,75	1,55
4	442,4	867	54,82	1,58
5	461,15	904	55,31	1,63
Moyenne	439,18	861	54,80	1,57
SD	14,9	29,19	0,31	0
COV (%)	3,39	3,39	0,71	2,96

Tableau 4.9: Propriétés en traction des barres d'armature Aslan No. 8



Figure 4.19: Barres d'armature Aslan No. 8 avant rupture



Figure 4.20: Barres d'armature Aslan No. 8 après rupture

4.4 Barres d'armature MSTBAR

Pour terminer avec les essais de traction, nous allons voir les différents essais effectués sur des barres d'armatures en PRFV MSTBAR.

Spécimen	Force ultime (kN)	Contrainte ultime (MPa)	Module d'élasticité (GPa)	Déformation ultime (%)
1	/	/	/	/
2	215	1080	66,14	1,63
3	222	1116	60,49	1,84
4	219	1101	63,73	1,73
5	228	1146	64,55	1,77
Moyenne	177	1111	63,73	1,74
SD	5.48	69.39	3,8	0
COV (%)	3,1	6,42	5,94	5,08

Tableau 4.10 : Propriétés en traction des barres d'armature MSTBAR



Figure 4.21: Barres d'armature MSTBAR No. 5 avant rupture



Figure 4.22: Barres d'armature MSTBAR après rupture

4.5 Résumé des propriétés en traction des barres en PRFV

Un résumé du calcul des propriétés est effectué dans le tableau 4.11 avec le diamètre nominal de chaque barre :

Barres PRFV	Diamètre nominal (mm)	Force ultime (kN)	Contrainte ultime (MPa)	Module d'élasticité (GPa)	Déformation ultime (%)
V-ROD	15	326,13	1639	71,01	2,31
	20	428,01	1507	71,67	2,10
	25	560,20	1098	69,60	1,58
Aslan	15	242,80	1220	54,70	2,23
	20	316,20	1113	55,18	2,02
	25	439,18	861	54,80	1,57
ComBAR	15	312,64	1571	69,55	2,26
	20	456,54	1608	78,49	2,05
	25	548,63	1076	69,33	1,55
MSTBAR	15	215,20	111	63,73	1,74

Tableau 4.11 : Résumé des propriétés calculées pour chaque diamètre de barres

Les propriétés de toutes les barres ont été calculées ce qui permet de visualiser une différence entre les valeurs fournies par les différents manufacturiers et les valeurs obtenues expérimentalement. Ces propriétés sont utilisées lors des prochains calculs, ils interviennent notamment dans le calcul des coefficients d'adhérence des barres.

CHAPITRE 5 ESSAIS DE FLEXION

Ce chapitre présente les résultats expérimentaux provenant des vingt poutres, et ce chapitre est séparé en plusieurs sections: les propriétés du béton utilisé, les modes de rupture des poutres et les principaux résultats expérimentaux. Dans la première section, les résistances du béton sont résumées pour chaque poutre. Dans la deuxième section, les modes de rupture de chaque poutre testée sont présentés. Dans la troisième section, les résultats expérimentaux sont présentés pour toutes les poutres et les résultats obtenus sont comparés entre eux pour chaque poutre. Deux poutres sont réalisées pour chaque diamètre de barres, ce qui a permis d’avoir des résultats précis et cohérents pour les calculs. Les poutres ayant toutes une désignation particulière, la désignation de chaque poutre est décrite dans le tableau ci-après.

Barres PRFV	ComBAR			V-ROD			Aslan			MST BAR
Diamètre nominal des barres (mm)	15	20	25	15	20	25	15	20	25	15
Désignation des poutres	C5-1	C6-1	C8-1	P5-1	P6-1	P8-1	A5-1	A6-1	A8-1	M5-1
	C5-2	C6-2	C8-2	P5-2	P6-2	P8-2	A5-2	A6-2	A8-2	M5-2

Tableau 5.1: Désignation des poutres

5.1 Modes de rupture

Les poutres renforcées de barres d’armature en PRFV peuvent avoir des modes de rupture différents selon le dimensionnement effectué. Les modes de rupture sont la rupture par compression du béton, par tension du PRF ou la rupture par équilibre (la rupture par compression du béton survient en même temps que celle par tension du PRF). Généralement, le dimensionnement de structures par rupture par compression du béton est recommandé par de nombreuses normes puisque l’apparition de cette rupture est visible bien avant que la structure soit rompue, alors qu’il est n’est pas possible de visualiser une rupture par tension des barres

lorsque celle-ci apparaît. Pour notre cas, le mode de rupture par compression du béton a été envisagé. Le tableau présentant les paramètres de tests avec les différents ratios sera mis en avant dans la section 5.2.

5.1.1 Poutres renforcées par des barres d'armature ComBAR

Les poutres testées renforcées avec des barres d'armature ComBAR ont toutes rompues par compression du béton comme aperçu sur les figures suivantes.

5.1.1.1 Poutres C5-1 et C5-2

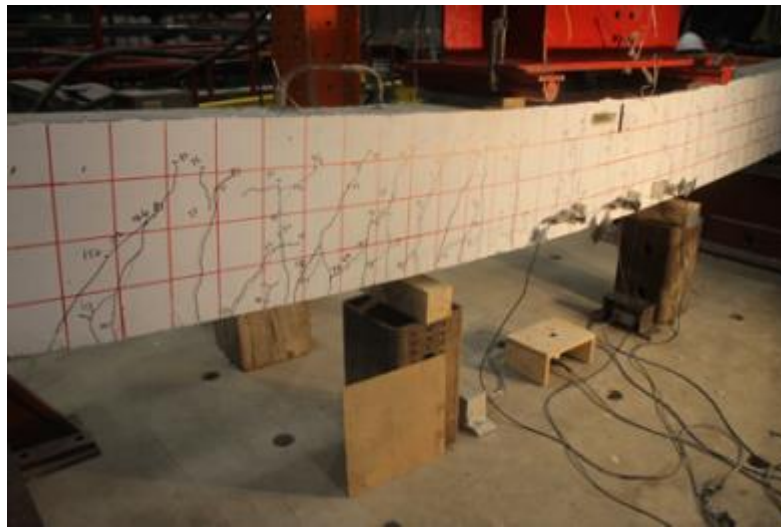


Figure 5.1: Poutre C5-1 avant rupture



Figure 5.2: Poutre C5-1 après rupture

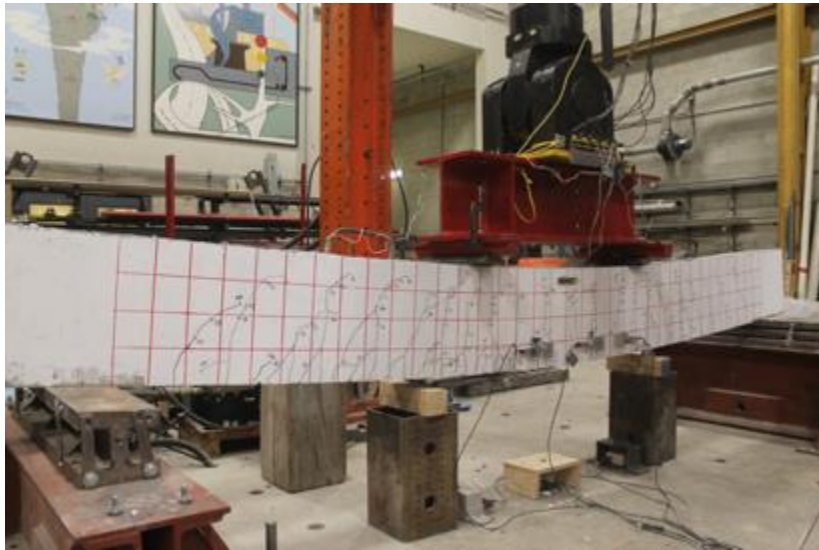
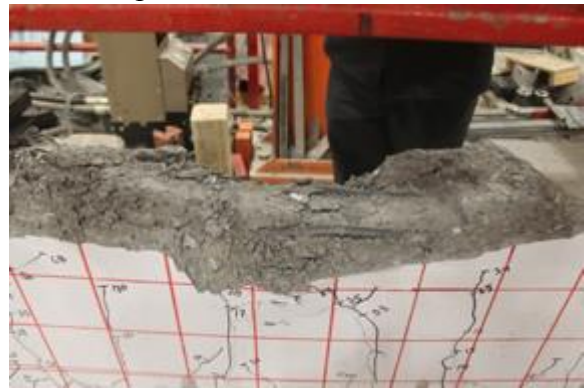


Figure 5.3: Poutre C5-2 avant rupture



Figure 5.4: Poutre C5-2 après rupture

Figure 5.5: 2^{ème} vue poutre C5-2 après rupture

5.1.1.2 Poutres C6-1 et C6-2

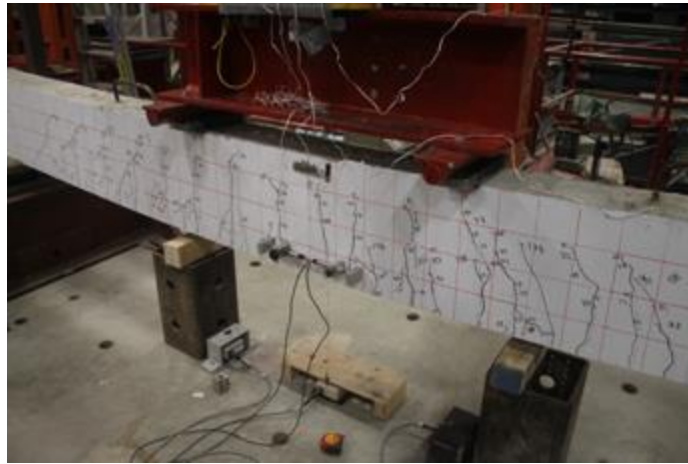


Figure 5.6: Poutre C6-1 avant rupture



Figure 5.7: Poutre C6-1 après rupture



Figure 5.8: 2^{ème} vue poutre C6-1 après rupture

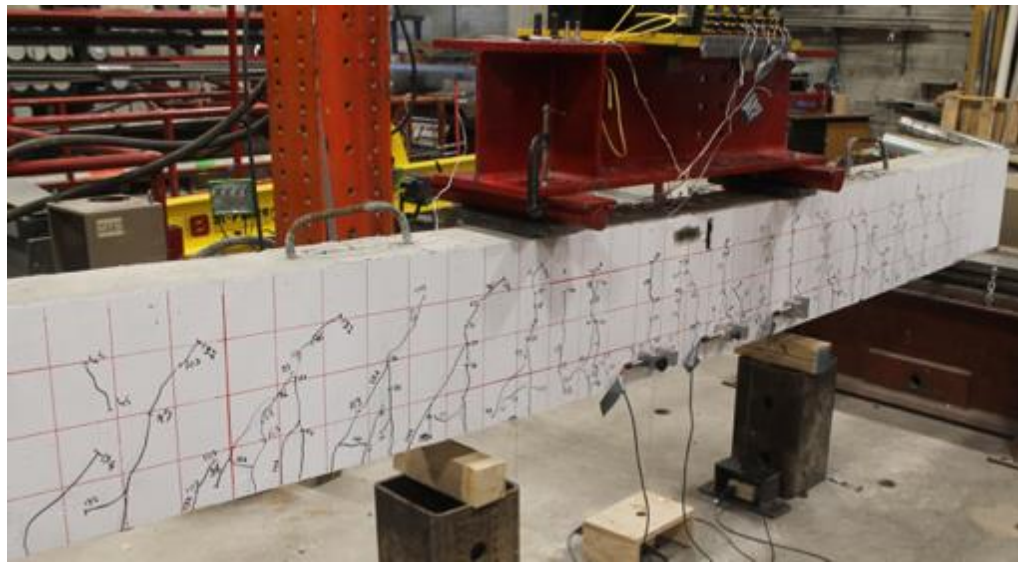


Figure 5.9: Poutre C6-2 avant rupture



Figure 5.10: Poutre C6-2 après rupture

5.1.1.3 Poutres C8-1 et C8-2

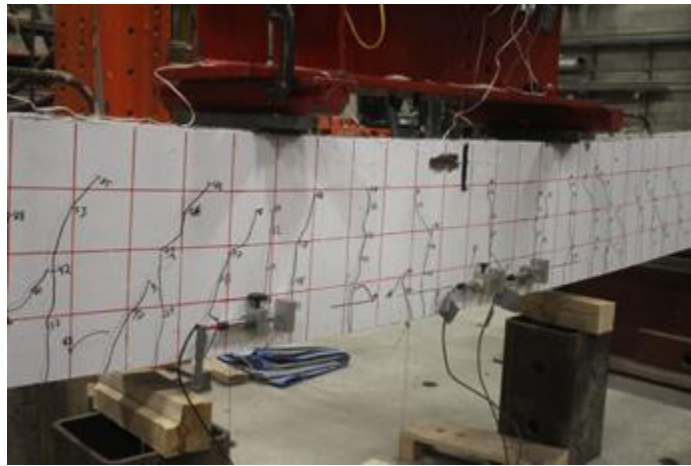


Figure 5.11: Poutre C8-1 avant rupture



Figure 5.12: Poutre C8-1 après rupture

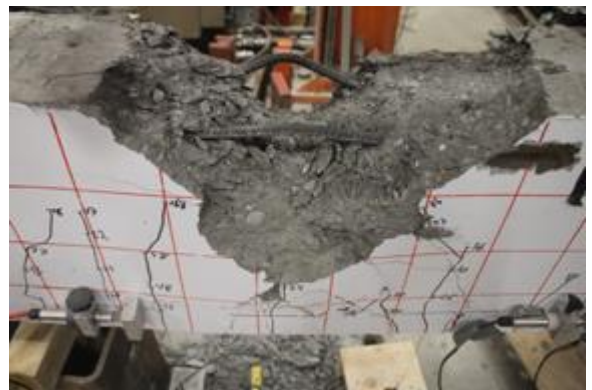


Figure 5.13: 2^{ème} vue poutre C8-1 après rupture



Figure 5.14: Poutre C8-2 avant rupture



Figure 5.15: Poutre C8-2 après rupture



Figure 5.16: 2^{ème} vue poutre C8-2 après rupture

5.1.2 Poutres renforcées par des barres d'armature V-ROD

Les poutres testées renforcées avec des barres d'armature V-ROD ont toutes rompues par compression du béton comme aperçu sur les figures suivantes.

5.1.2.1 Poutres P5-1 et P5-2

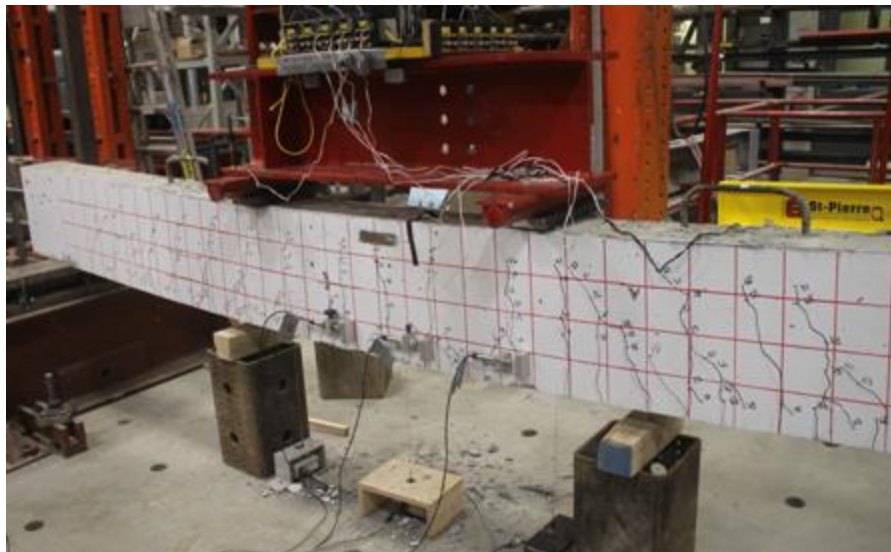


Figure 5.17: Poutre P5-1 avant rupture

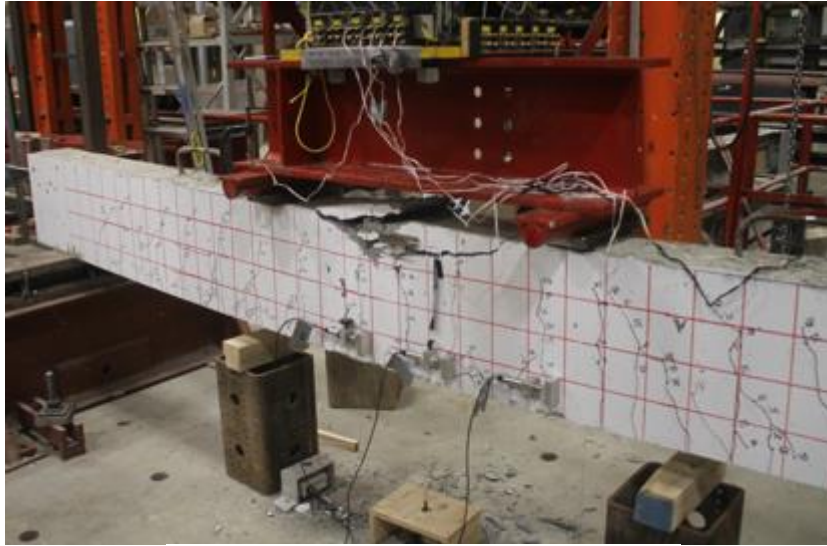


Figure 5.18: Poutre P5-1 après rupture

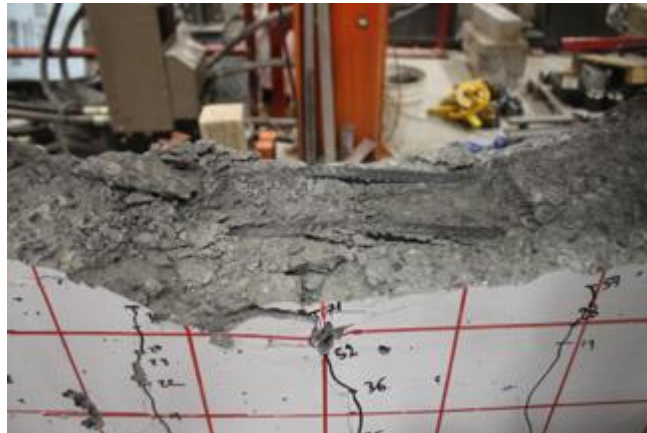


Figure 5.19: 2^{ème} vue poutre P5-1 après rupture

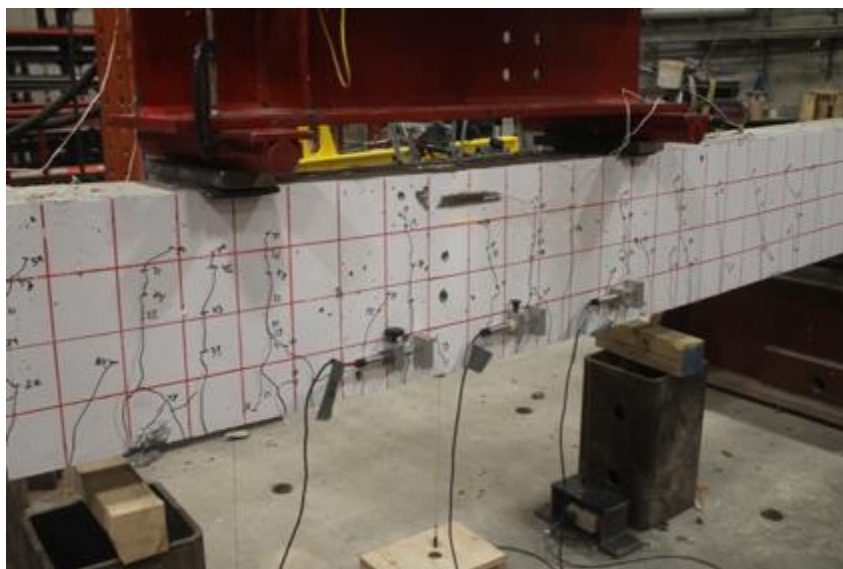


Figure 5.20: Poutre P5-2 avant rupture



Figure 5.21: Poutre P5-2 après rupture

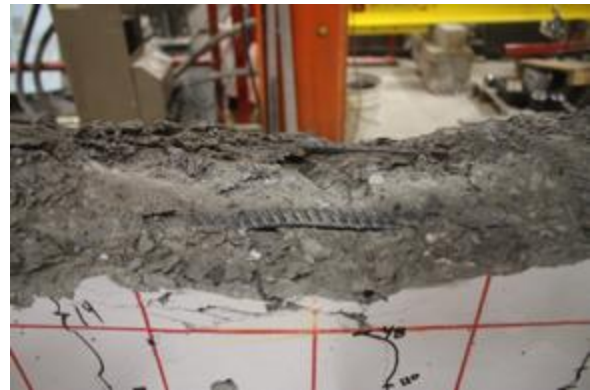


Figure 5.22: 2^{ème} vue poutre P5-2 après rupture

5.1.2.2 Poutres P6-1 et P6-2

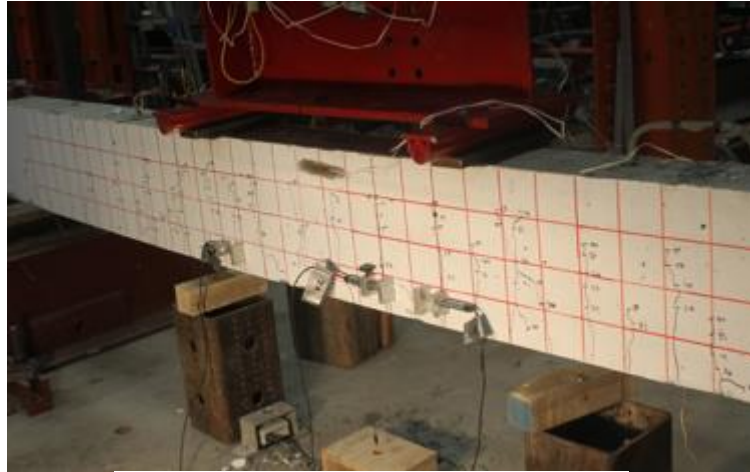


Figure 5.23: Poutre P6-1 avant rupture

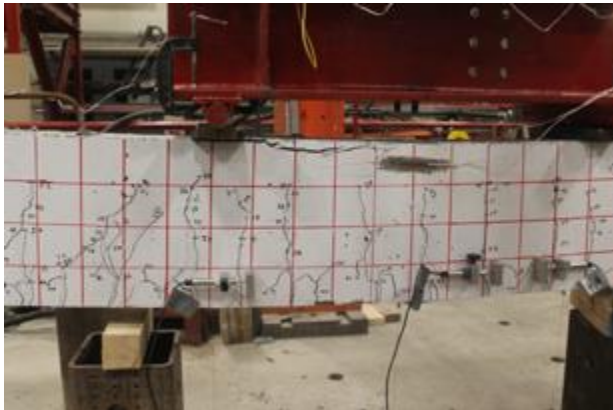


Figure 5.24: Poutre P6-1 après rupture



Figure 5.25: 2eme vue poutre P6-1 après rupture

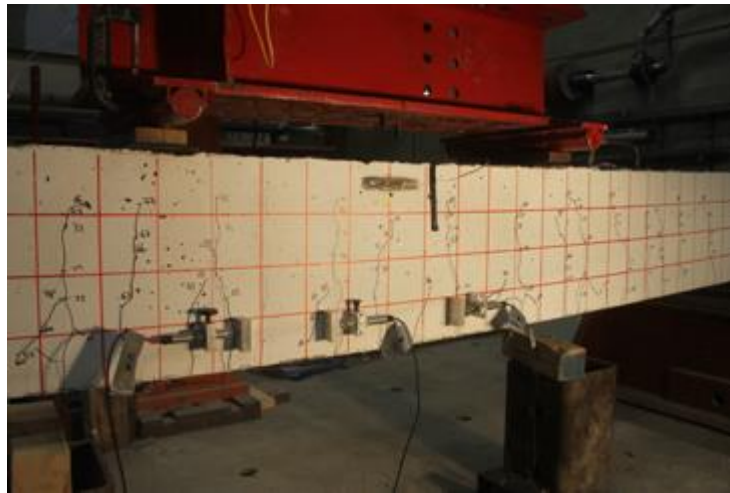


Figure 5.26: Poutre P6-2 avant rupture

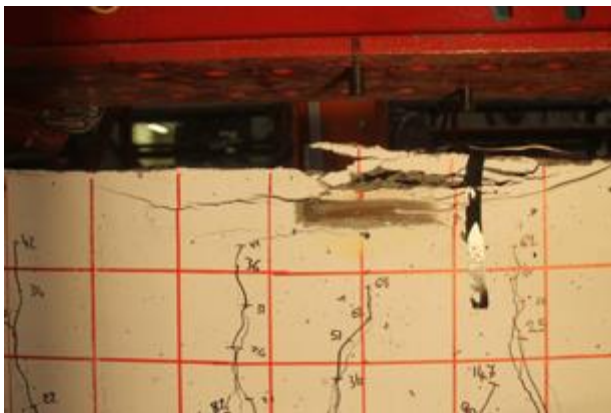


Figure 5.27: Poutre P6-2 après rupture

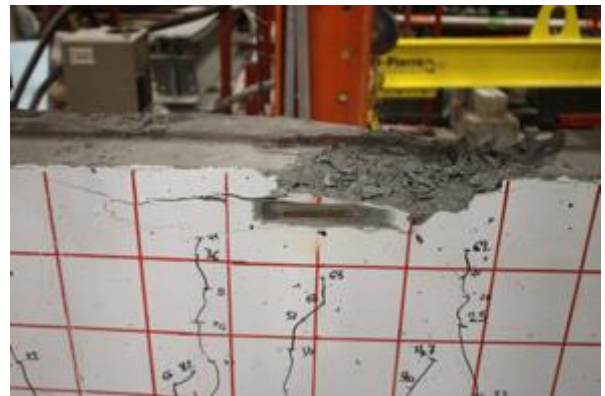


Figure 5.28: 2^{ème} poutre P6-2 après rupture

5.1.2.3 Poutres P8-1 et P8-2

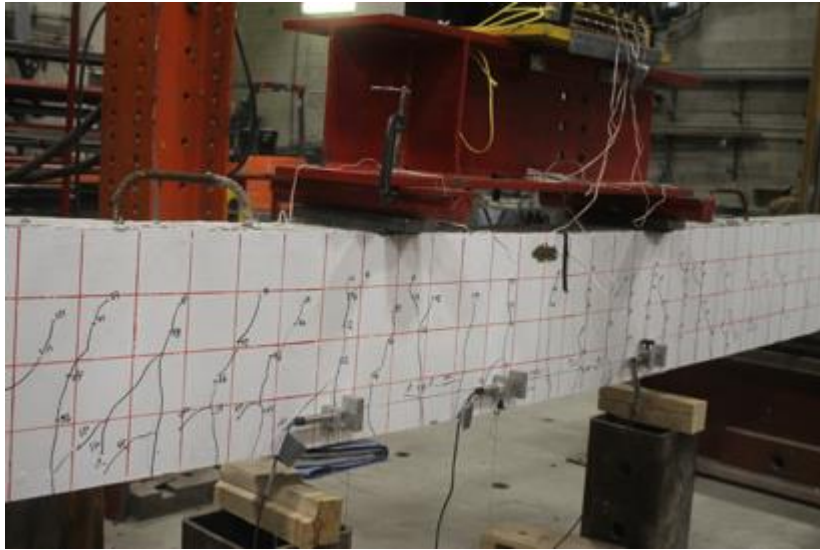


Figure 5.29: Poutre P8-1 avant rupture



Figure 5.30: Poutre P8-1 après rupture



Figure 5.31: 2^{ème} vue poutre P8-1 après rupture



Figure 5.32: Poutre P8-2 avant rupture



Figure 5.33: Poutre P8-2 après rupture

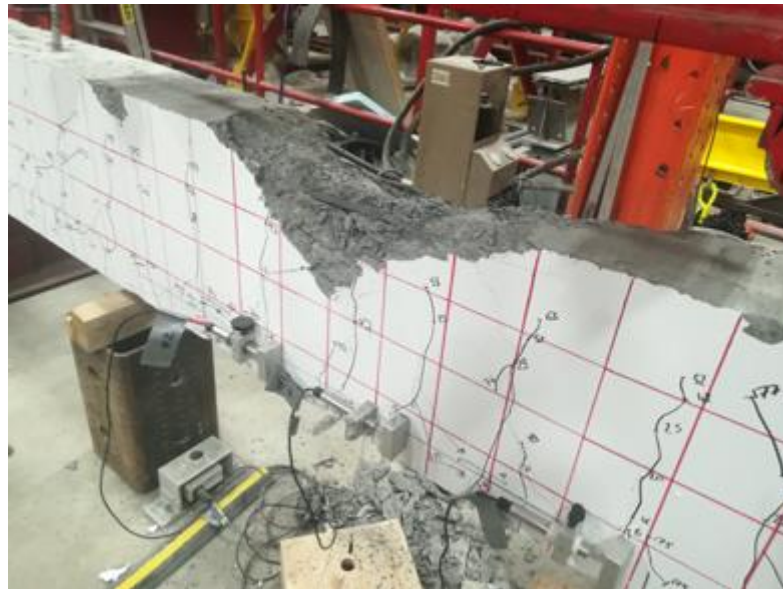


Figure 5.34: 2^{ème} vue poutre P8-2 après rupture

5.1.3 Poutres renforcées par des barres d'armature Aslan

Les poutres testées renforcées avec des barres d'armature Aslan ont toutes rompues par compression du béton sauf une poutre où une rupture équilibrée est apparue (rupture par traction des barres en même temps que la rupture par compression du béton) comme aperçu sur les figures suivantes.

5.1.3.1 Poutres A5-1 et A5-2

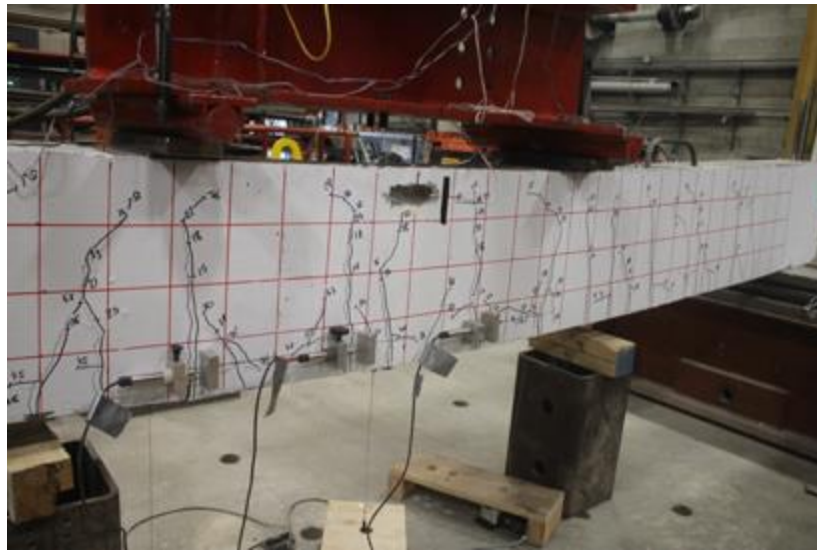


Figure 5.35: Poutre A5-1 avant rupture



Figure 5.36: Poutre A5-1 après rupture (rupture par compression du béton)



Figure 5.37: 2eme vue poutre A5-1 après rupture

Cette poutre commençait par rompre par tension des barres mais il y a finalement eu rupture par compression du béton bien avant la rupture par tension des barres. Ce mode de rupture est donc une rupture par compression du béton.

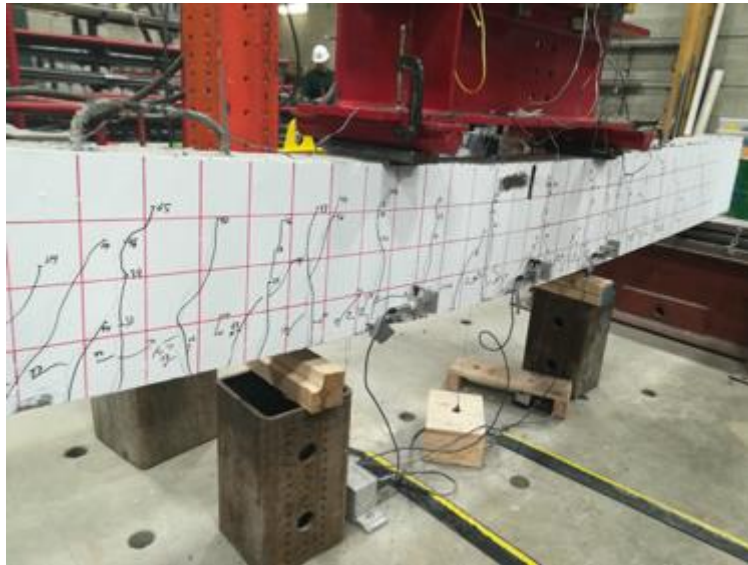


Figure 5.38: Poutre A5-2 avant rupture



Figure 5.39: Poutre A5-2 après rupture (rupture équilibrée)



Figure 5.40: Rupture des barres poutre A5-2

Il y a eu rupture par tension des barres et par compression du béton en même temps pour cette poutre comme on peut le voir sur les figures ci-dessus. Par conséquent, le mode de rupture de cette poutre est une rupture équilibrée.

5.1.3.2 Poutres A6-1 et A6-2

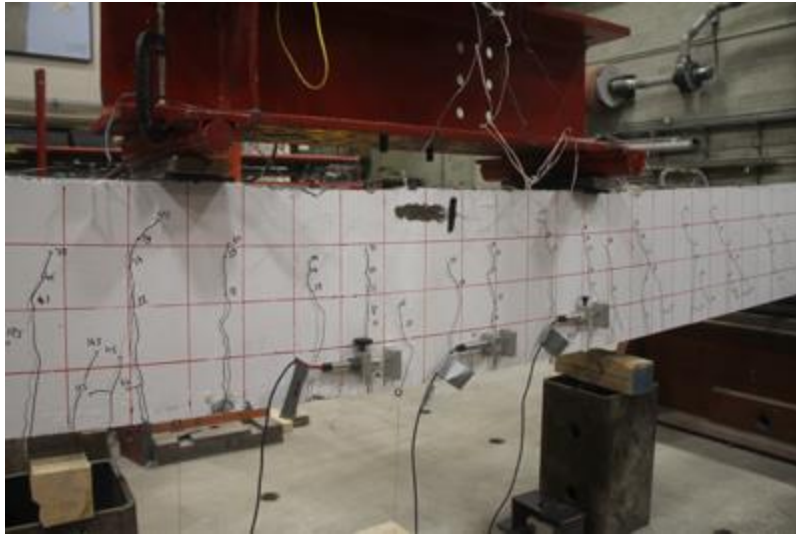


Figure 5.41: Poutre A6-1 avant rupture



Figure 5.42: Poutre A6-1 après rupture

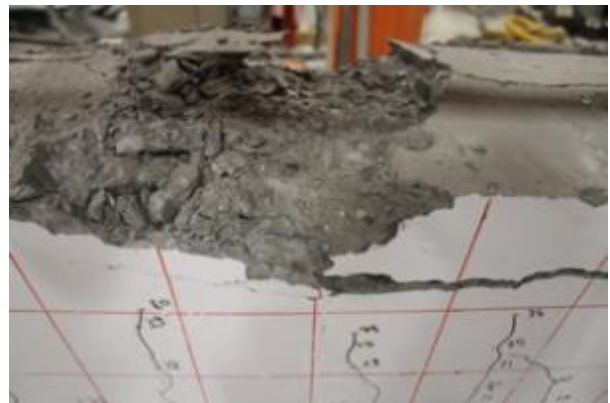


Figure 5.43: 2^{ème} vue poutre A6-1 après rupture

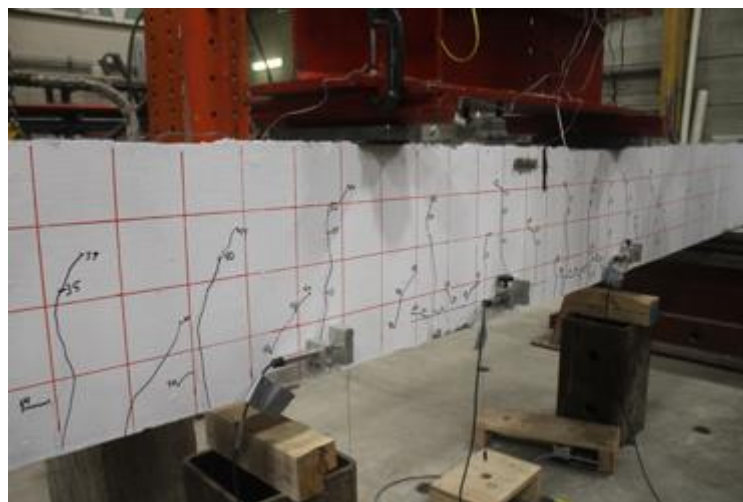


Figure 5.44: Poutre A6-2 avant rupture

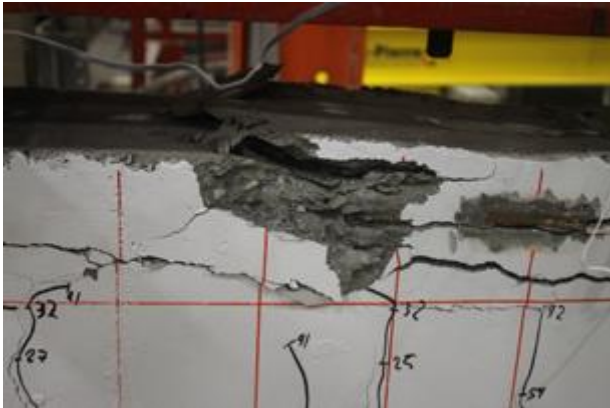


Figure 5.45: Poutre A6-2 après rupture

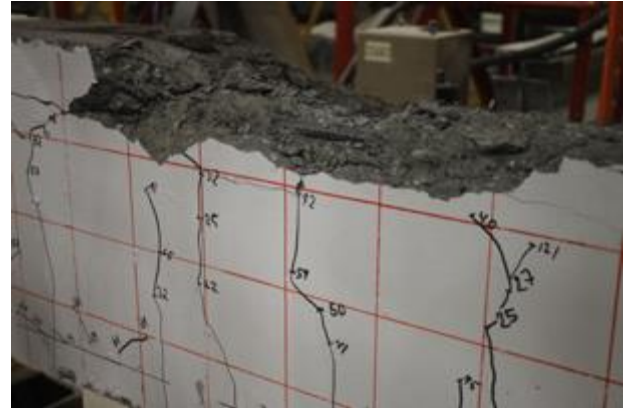


Figure 5.46: 2^{ème} vue poutre A6-2 après rupture

5.1.3.3 Poutres A8-1 et A8-2

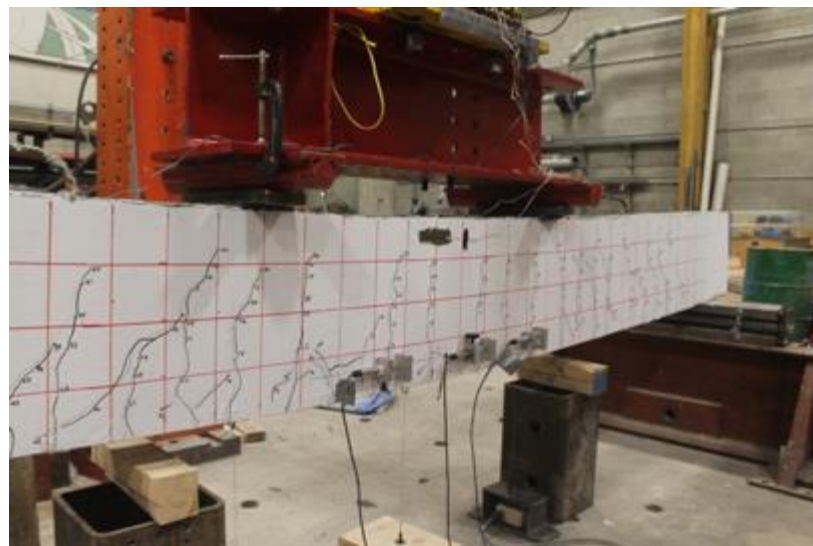


Figure 5.47: Poutre A8-1 avant rupture



Figure 5.48: Poutre A8-1 après rupture

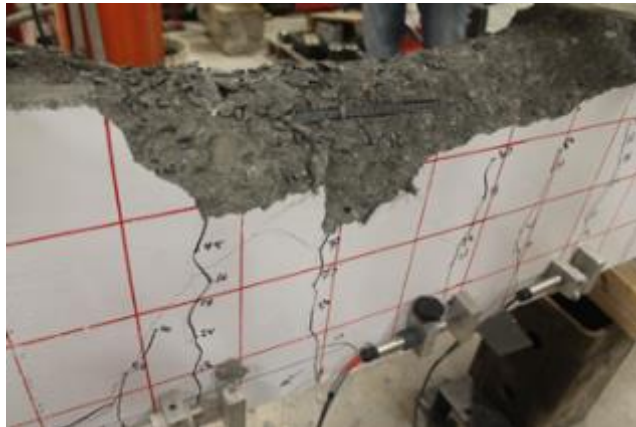


Figure 5.49: 2^{ème} vue poutre A8-1 après rupture

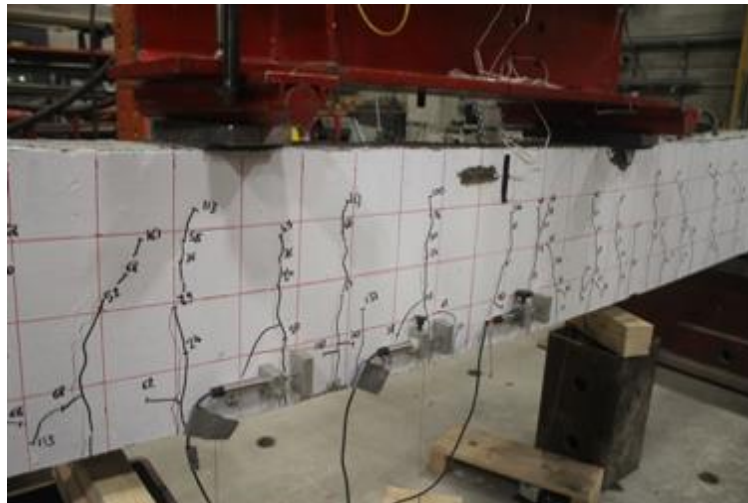


Figure 5.50: Poutre A8-2 avant rupture

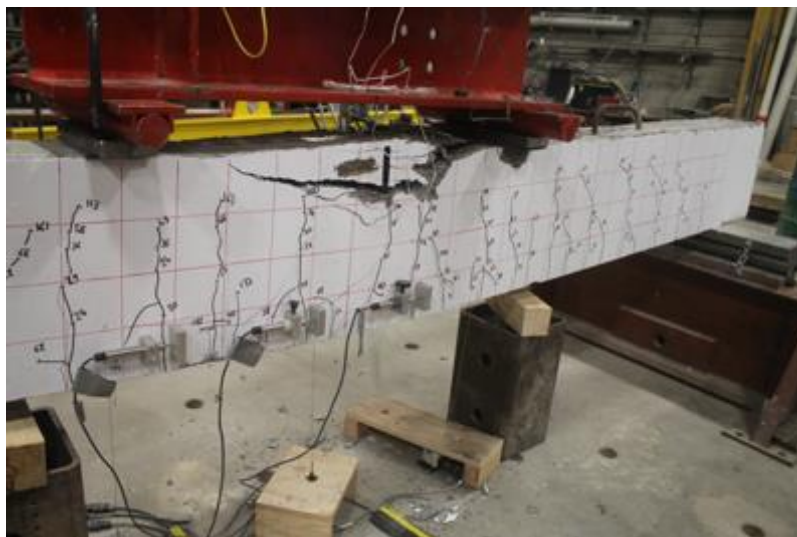


Figure 5.51: Poutre A8-2 après rupture

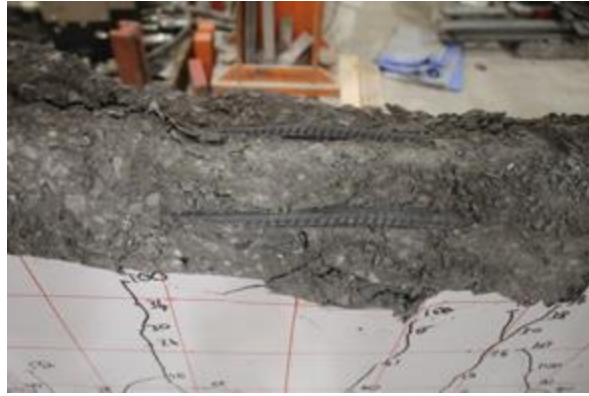


Figure 5.52: 2^{ème} vue poutre A8-2 après rupture

5.1.4 Poutres renforcées par des barres d'armature MSTBAR

Les poutres testées renforcées avec des barres d'armature MSTBAR ont toutes deux rompues par tension des barres en PRFV comme aperçu sur les figures suivantes. Nous n'avons que des barres de diamètre nominal 15 mm.

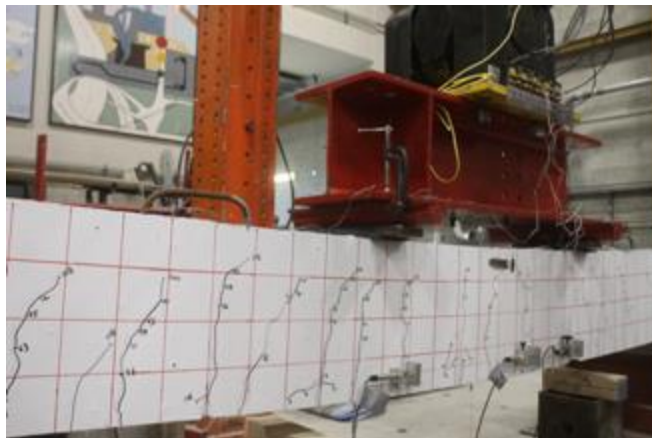


Figure 5.53: Poutre M5-1 avant rupture



Figure 5.54: Poutre M5-1 après rupture



Figure 5.55: 2eme vue poutre M5-1 après rupture

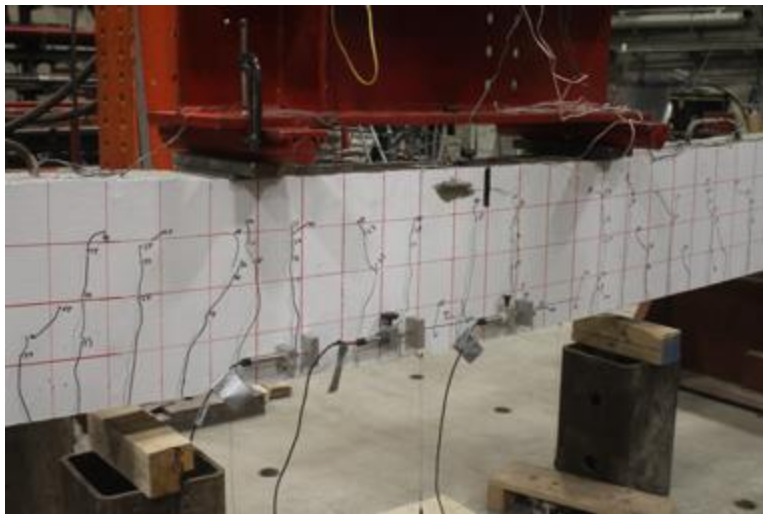


Figure 5.56: Poutre M5-2 avant rupture

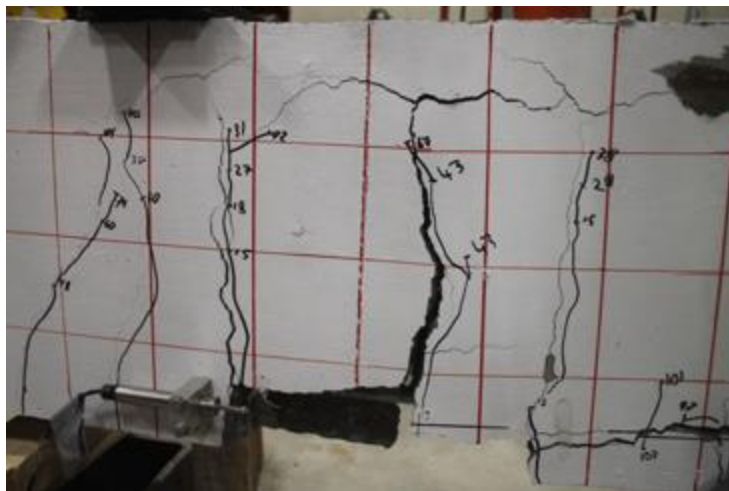


Figure 5.57: Poutre M5-2 après rupture



Figure 5.58: 2^{ème} vue poutre M5-2 après rupture

5.1.5 Résumé des modes de rupture

Un résumé des modes de rupture de toutes les poutres est présenté dans le tableau ci-après.

Poutres	Mode de rupture
C5-1/C5-2	Rupture par compression du béton
C6-1/C6-2	Rupture par compression du béton
C8-1/C8-2	Rupture par compression du béton
P5-1/P5-2	Rupture par compression du béton
P6-1/P6-2	Rupture par compression du béton
P8-1/P8-2	Rupture par compression du béton
A5-1	Rupture par compression du béton
A5-2	Rupture équilibrée
A6-1/A6-2	Rupture par compression du béton
A8-1/A8-2	Rupture par compression du béton
M5-1/M5-2	Rupture par tension des barres

Tableau 5.2: Modes de rupture des poutres

Les poutres M5-1 et M5-2 ont toutes deux rompues par tension des barres ce qui est dû aux propriétés des barres en PRF.

5.2 Résultats expérimentaux

Dans la section précédente, les différents modes de rupture des poutres ont été résumés pour chaque poutre. Au total, 17 poutres ont rompu par compression du béton, une poutre par rupture équilibrée et les deux dernières par tension des barres. Comme expliqué dans le chapitre 3, les poutres ont été instrumentées avec des LVDT pour mesurer les largeurs de fissure mais également avec trois potentiomètres permettant de mesurer la flèche de la poutre au milieu et sous chaque charge. Les résultats mis en avant dans cette section seront les différentes flèches mesurées à chaque endroit pour chaque poutre, les valeurs de toutes les largeurs de fissure mesurées sous forme de graphiques et de tableaux avec la force calculée lorsque la première fissure apparaît, ainsi que les coefficients d'adhérence de chaque barre grâce aux largeurs de fissure mesurées.

5.2.1 Paramètres de tests

Les poutres ont toutes été renforcées par deux barres dans le bas des poutres en PRFV, deux barres en acier dans le haut et des étriers. Les paramètres de tests concernent les deux barres en PRFV avec leurs déformations maximales, leurs modules d'élasticité, ratios, etc.

Ces différents paramètres sont résumés dans le tableau 5.3 ci-après.

Poutres	Barres PRFV	Nbre de barres	Aire pour 2 barres (mm ²)	f _c (MPa)	f _{tu} (MPa)	E (GPa)	ρ _r (%)	ρ _b (%)
P5-1	No.5	2	398	42.1	1639	71.01	0.581	0.230
P5-2	No. 5	2	398	42.1	1639	71.01	0.581	0.230
P6-1	No. 6	2	568	42.1	1507	71.67	0.835	0.271
P6-2	No. 6	2	568	42.1	1507	71.67	0.835	0.271
P8-1	No. 8	2	1020	49.5	1098	69.60	1.511	0.537
P8-2	No. 8	2	1020	49.5	1098	69.60	1.511	0.537
A5-1	No. 5	2	398	45.5	1220	54.70	0.581	0.339
A5-2	No. 5	2	398	45.5	1220	54.70	0.581	0.339
A6-1	No. 6	2	568	45.5	1113	55.18	0.835	0.405
A6-2	No. 6	2	568	49.4	1113	55.18	0.835	0.431
A8-1	No. 8	2	1020	45.5	861	54.80	1.511	0.644
A8-2	No. 8	2	1020	49.4	861	54.80	1.511	0.687
C5-1	No. 5	2	398	46	1573	66.45	0.581	0.252
C5-2	No. 5	2	398	46	1573	66.45	0.581	0.252
C6-1	No. 6	2	568	46	1608	78.49	0.835	0.279
C6-2	No. 6	2	568	46	1608	78.49	0.835	0.279
C8-1	No. 8	2	1020	49.5	1076	69.33	1.511	0.556
C8-2	No. 8	2	1020	49.5	1076	69.33	1.511	0.556
M5-1	No. 5	2	398	45.5	1081	63.73	0.581	0.482
M5-2	No. 5	2	398	45.5	1081	63.73	0.581	0.482

Tableau 5.3: Paramètres de tests

5.2.2 Flèche des poutres

Les poutres ont été instrumentées avec trois potentiomètres comme on peut le voir sur la figure suivante mais seule la flèche au milieu des poutres par rapport à la charge appliquée est mise en avant dans les graphiques suivants. Un potentiomètre a été placé au milieu de chaque poutre et les deux autres sous chaque charge. Les courbes correspondantes aux flèches des poutres seront mises sur trois graphiques différents pour que les poutres renforcées avec des barres du même diamètre soient comparées.



Figure 5.59: Trois potentiomètres sous la poutre

5.2.2.1 Poutres A5-1 à A8-2

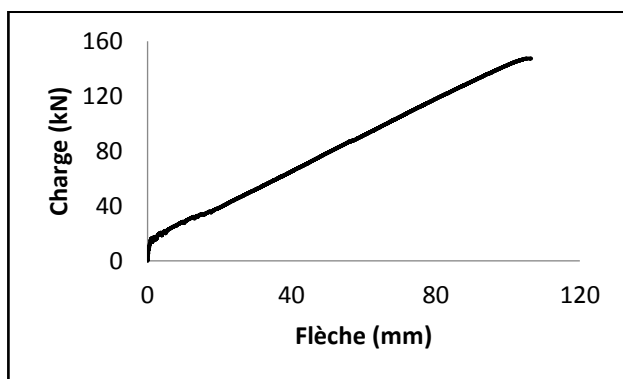


Figure 5.60: Charge en fonction de la flèche – Poutre A5-1

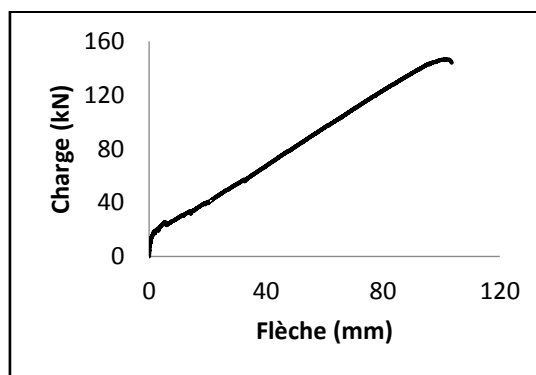


Figure 5.61: Charge en fonction de la flèche – Poutre A5-2

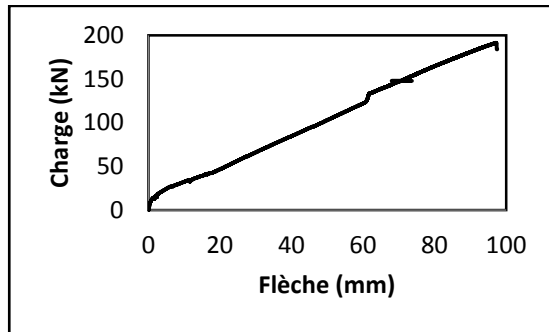


Figure 5.62: Charge en fonction de la flèche – Poutre A6-1

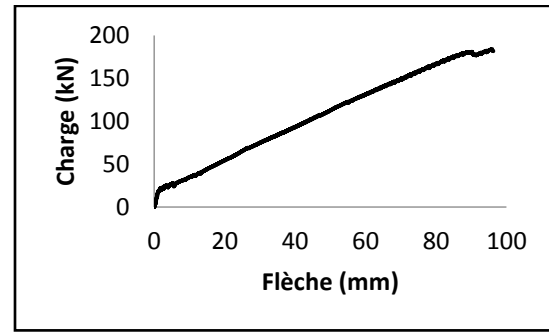


Figure 5.63: Charge en fonction de la flèche – Poutre A6-2

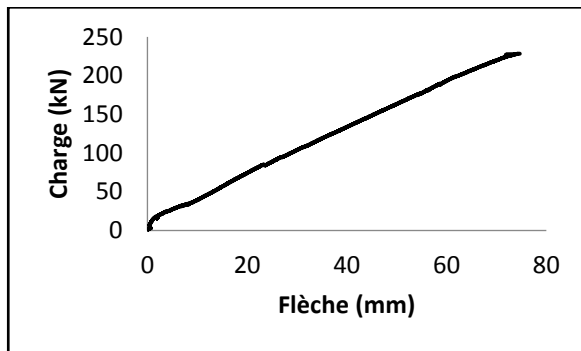


Figure 5.64: Charge en fonction de la flèche – Poutre A8-1

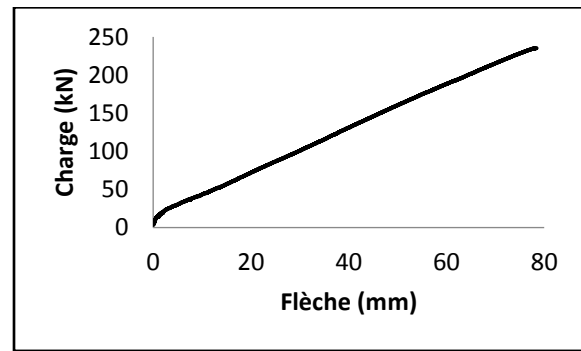


Figure 5.65: Charge en fonction de la flèche – Poutre A8-2

Les poutres A5-1 et A5-2 atteignent une flèche maximale d'un peu plus de 10cm, A6-1 et A6-2 environ 9.5cm, A8-1 et A8-2 un peu moins de 8cm. On remarque donc que les flèches obtenues sont similaires pour deux poutres renforcées avec les mêmes barres d'armature en PRFV.

5.2.2.2 Poutres P5-1 à P8-2

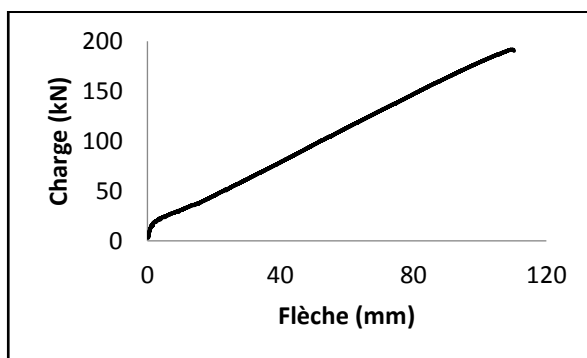


Figure 5.66: Charge en fonction de la flèche – Poutre P5-1

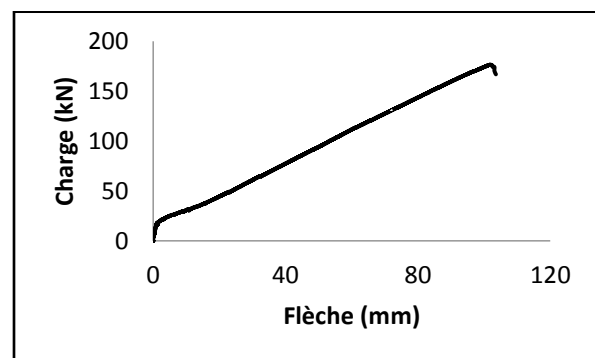


Figure 5.67: Charge en fonction de la flèche – Poutre P5-2

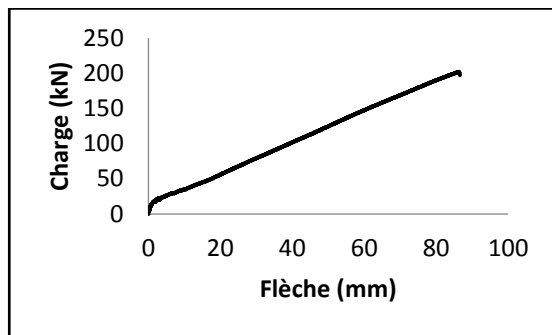


Figure 5.68: Charge en fonction de la flèche – Poutre P6-1

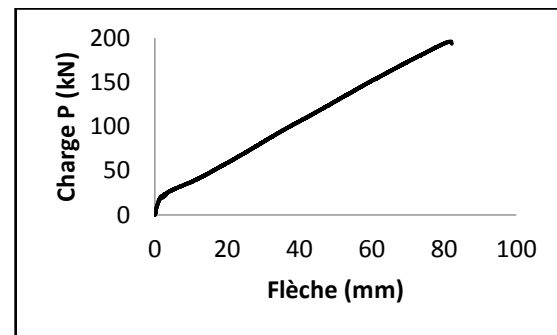


Figure 5.69: Charge en fonction de la flèche – Poutre P6-2

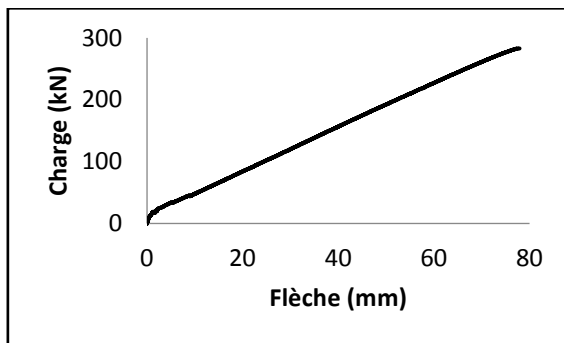


Figure 5.70: Charge en fonction de la flèche – Poutre P8-1

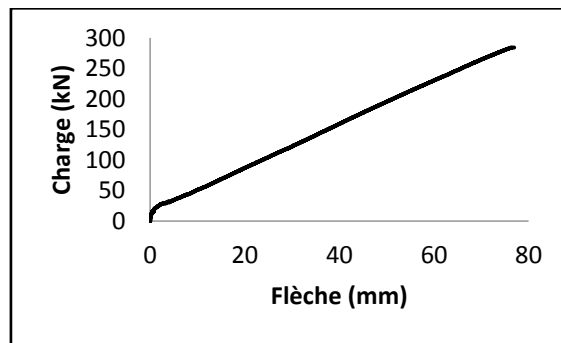


Figure 5.71: Charge en fonction de la flèche – Poutre P8-2

Les poutres P5-1 et P5-2 atteignent une flèche maximale d'un peu plus de 10cm, P6-1 et P6-2 environ 8.5cm, P8-1 et P8-2 un peu moins de 8cm. On remarque donc que les résultats sont similaires aux poutres A5-1 à A8-2.

5.2.2.3 Poutres C5-1 à C8-2

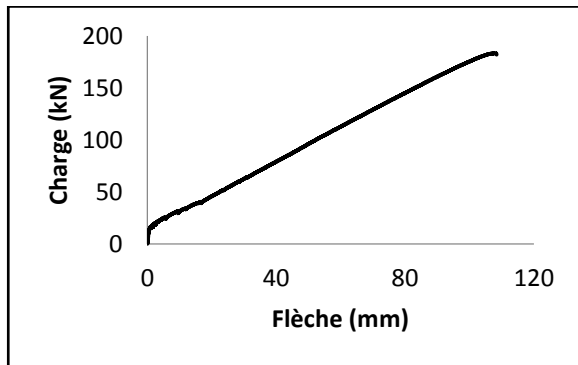


Figure 5.72: Charge en fonction de la flèche – Poutre C5-1

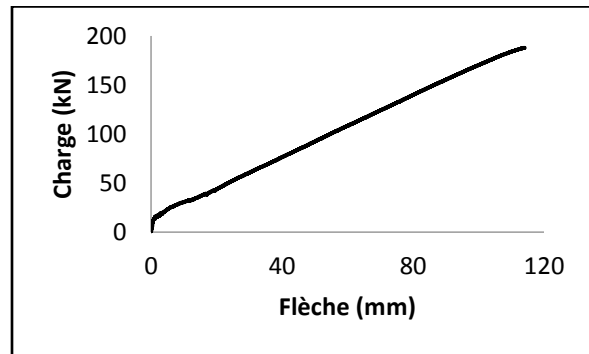


Figure 5.73: Charge en fonction de la flèche – Poutre C5-2

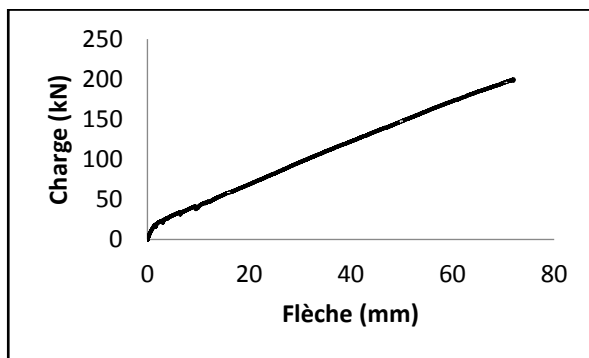


Figure 5.74: Charge en fonction de la flèche – Poutre C6-1

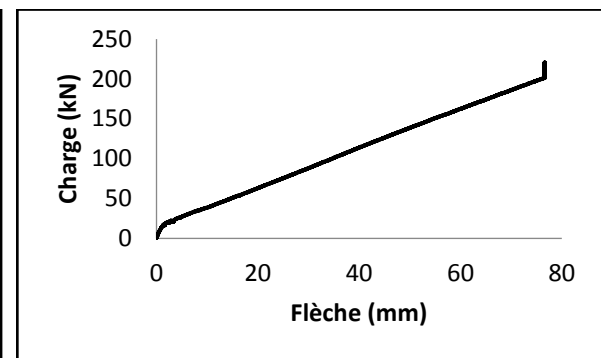


Figure 5.75: Charge en fonction de la flèche – Poutre C6-2

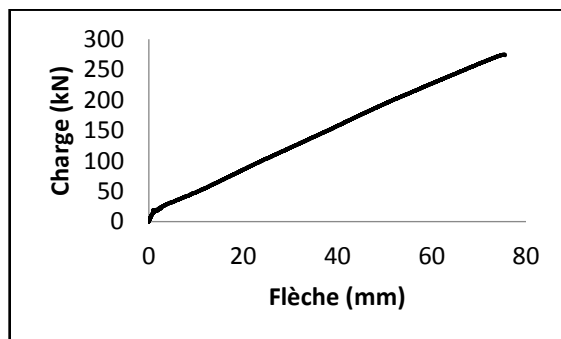


Figure 5.76: Charge en fonction de la flèche – Poutre C8-1

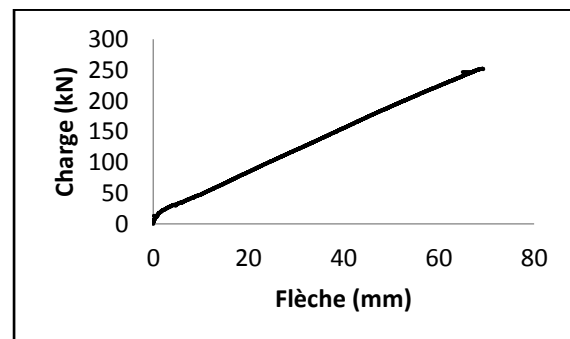


Figure 5.77: Charge en fonction de la flèche – Poutre C8-2

Les poutres C5-1 et C5-2 atteignent une flèche maximale d'un peu plus de 10cm, C6-1 et C6-2 environ 7.5cm, C8-1 et C8-2 aux environs de 7cm. On remarque donc que les flèches

obtenues diminuent avec l'augmentation du diamètre des barres comme pour les autres poutres testées, ce qui reste cohérent. Les résultats sont un peu différents par rapport aux poutres A5-1 à A8-2 et P5-1 à P8-2 mais restent dans le même ordre de grandeur.

5.2.2.4 Poutres M5-1 et M5-2

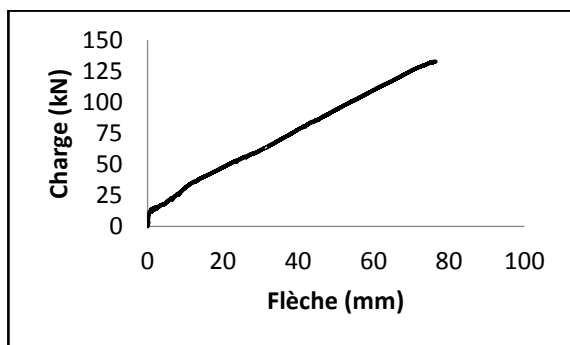


Figure 5.78: Charge en fonction de la flèche – Poutre M5-1

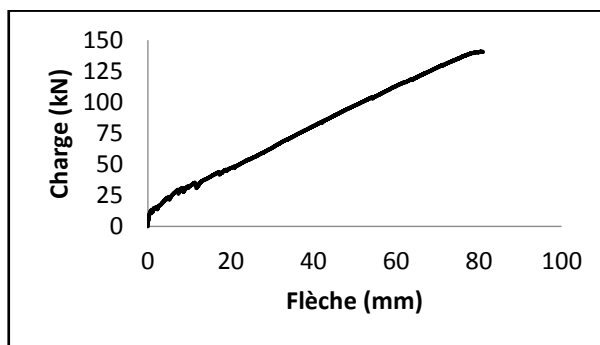


Figure 5.79: Charge en fonction de la flèche – Poutre M5-2

Les résultats pour ces poutres diffèrent un peu des autres poutres car il y a eu rupture par tension des barres en PRFV. Cette rupture est apparue avant la rupture par compression du béton, ce qui est différent des autres poutres. La flèche maximale pour ces poutres est d'environ 8cm.

Trois graphiques sont maintenant présentés comparant la flèche de chaque poutre renforcée avec des barres d'armature du même diamètre. Ils permettent de mieux comparer les différentes flèches obtenues pour chaque poutre.

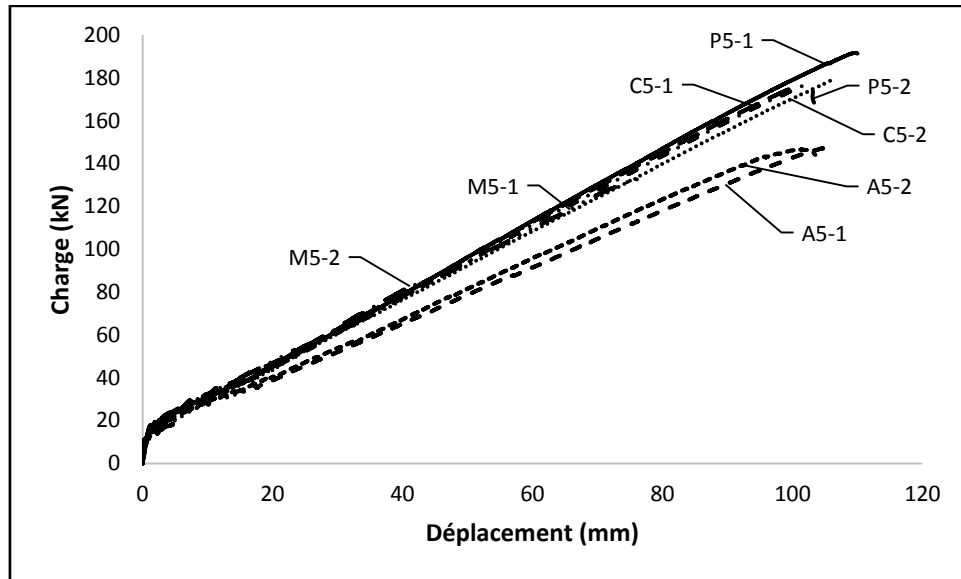


Figure 5.80: Charge en fonction de la flèche – Poutres renforcées avec des barres d'armature No. 5

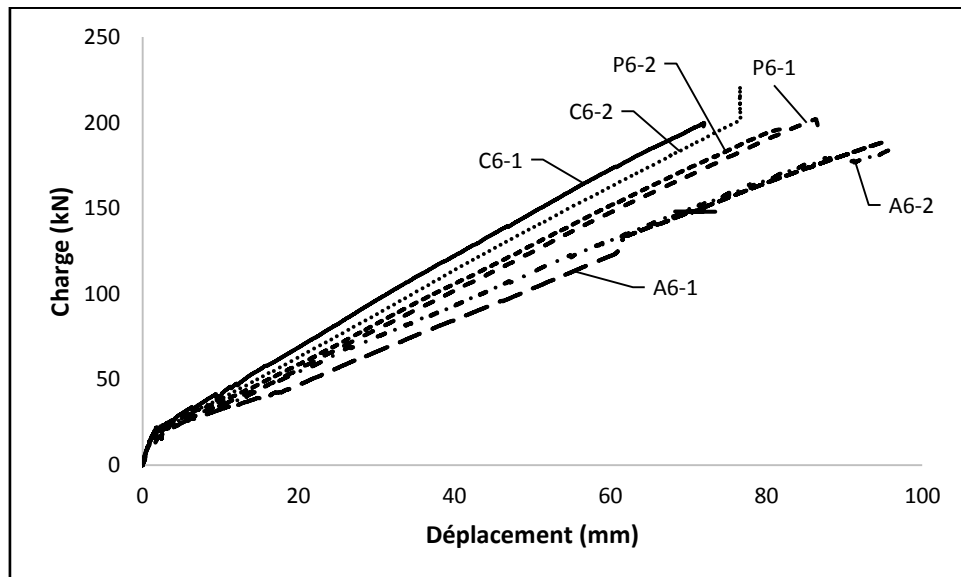


Figure 5.81: Charge en fonction de la flèche – Poutres renforcées avec des barres d'armature No. 6

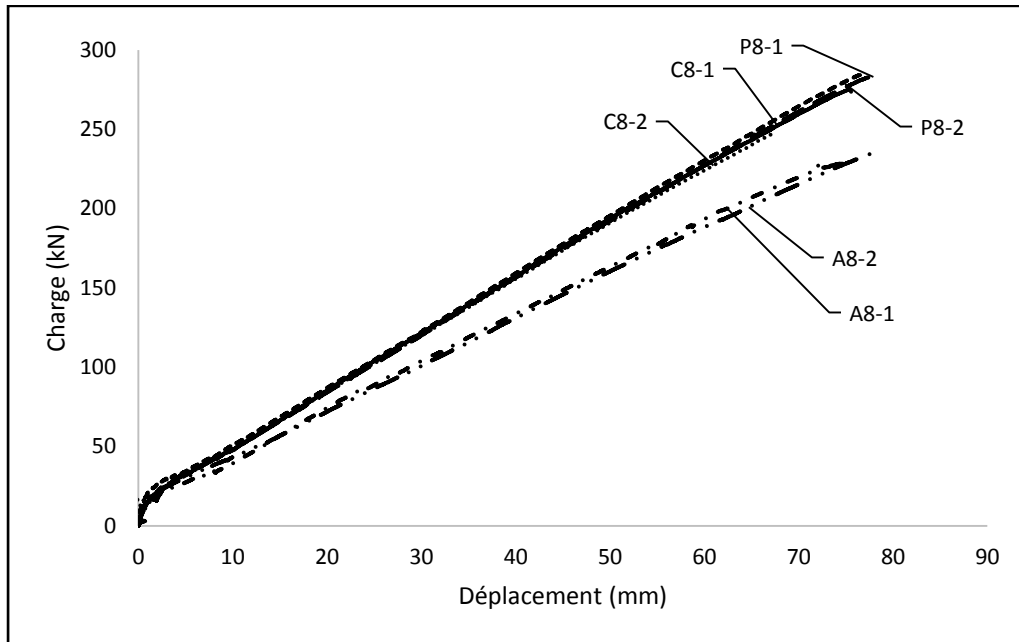


Figure 5.82: Charge en fonction de la flèche – Poutres renforcées avec des barres d'armature No. 8

Les flèches maximales atteintes avec la charge maximale avant rupture sont résumées dans le tableau ci-après.

Poutres	Flèche pot. centre (mm)	Charge maximale (kN)
A5-1	106.2	147.5
A5-2	101.0	146.6
A6-1	97.4	190.0
A6-2	95.9	184
A8-1	74.7	228.3
A8-2	78.4	235.3
P5-1	109.7	191.7
P5-2	101.9	176.6
P6-1	86.4	202
P6-2	81.8	196
P8-1	77.9	282.9
P8-2	76.9	284.2
C5-1	108.2	183.5
C5-2	114.1	188
C6-1	72.0	199.9
C6-2	76.6	220.5
C8-1	75.5	274.7
C8-2	69.2	252
M5-1	76.5	132.7
M5-2	80.9	140.7

Tableau 5.4: Flèches et charges maximales des poutres

On peut remarquer que les flèches maximales de chaque poutre restent similaires suivant les poutres renforcées avec des barres du même diamètre, sauf pour les poutres M5-1 et M5-2 étant donné le mode de rupture de celles-ci.

Concernant les charges maximales (la moyenne sur deux poutres est donnée)

- les poutres A5 atteignent une charge maximale de 147 kN alors que les poutres P5 ont une charge maximale de 184 kN, C5 ont une charge maximale de 186 kN et M5 ont une charge maximale de 136.7 kN. On remarque donc une différence entre ces poutres sauf pour P5 et C5 où les charges à la rupture restent similaires;
- les poutres A6, la charge maximale avant rupture est de 187 kN, les poutres P6 atteignent une charge maximale de 199 kN et les poutres C6 ont une charge maximale de 210 kN. Il n'y a pas de grande différence entre celles-ci.
- les poutres A8 ont rompu à la charge maximale de 232 kN, les poutres P8 ont une charge maximale de 283.5 kN et C8 ont une charge maximale de 263 kN. On observe ici une grande différence entre la charge à la rupture des poutres A8 et P8.

5.2.3 Largeurs de fissure

Les largeurs de fissure ont été mesurées pour chaque poutre dans le but de calculer les coefficients d'adhérence de chaque barre d'armature en PRFV. Ces largeurs de fissures ont été mesurées à l'aide d'un microscope pour la première largeur de fissure, puis à l'aide de trois LVDT. Les premières largeurs de fissure sont résumées dans le tableau ci-après. La charge atteinte pour l'obtention de la première fissure est également résumée dans le tableau ci-après.

Poutres	1 ^{ère} largeur de fissure (mm)	2 ^{ème} largeur de fissure (mm)	3 ^{ème} largeur de fissure (mm)	Charge à la 1 ^{ère} largeur de fissure (kN)
A5-1	0.04	0.09	0.08	15
A5-2	0.04	0.03	0.05	12
A6-1	0.07	0.08	0.09	15
A6-2	0.04	0.08	0.07	19
A8-1	0.04	0.05	0.04	18
A8-2	0.04	0.05	0.05	16
P5-1	0.03	0.06	0.04	15
P5-2	0.06	0.07	0.06	7
P6-1	0.06	0.09	0.08	21
P6-2	0.09	0.06	0.07	21
P8-1	0.03	0.04	0.03	19
P8-2	0.03	0.02	0.04	16
C5-1	0.06	0.07	0.08	16
C5-2	0.05	0.9	0.1	14
C6-1	0.03	0.02	/	17
C6-2	0.1	0.1	0.07	17
C8-1	0.04	0.05	0.05	19
C8-2	0.03	0.03	0.02	13
M5-1	0.06	0.07	0.06	14
M5-2	0.07	0.06	0.12	19

Tableau 5.10: Premières largeurs de fissure et charges apparues à la 1^{ère} fissure

Comme expliqué précédemment, les trois premières largeurs de fissure qui sont apparues ont été mesurées jusqu'à la rupture de la poutre. Des graphiques permettent d'illustrer la progression des largeurs de fissures avec l'augmentation continue des charges appliquées sur les différentes poutres. Ayant trois LVDT pour mesurer les largeurs de fissure, la plus grande largeur de fissure atteinte sera montrée dans ces graphiques.

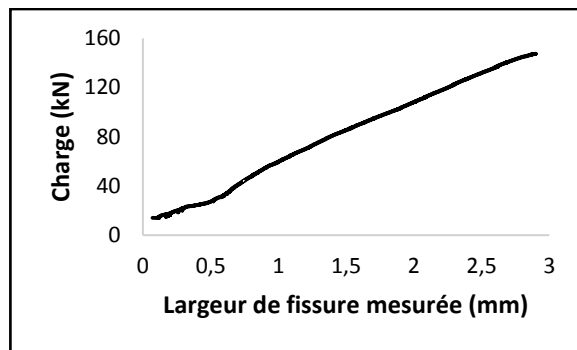


Figure 5.83: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutre A5-1

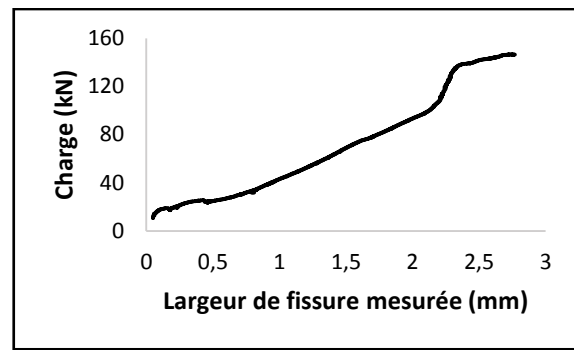


Figure 5.84: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutre A5-2

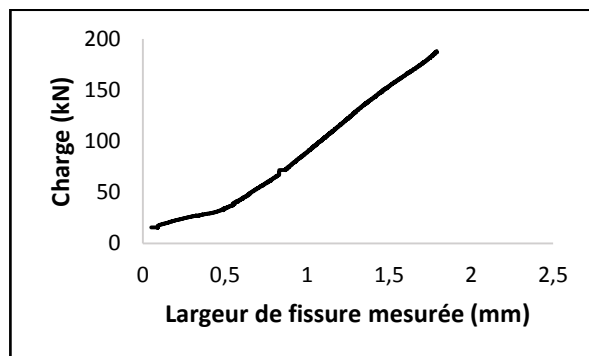


Figure 5.85: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutre A6-1

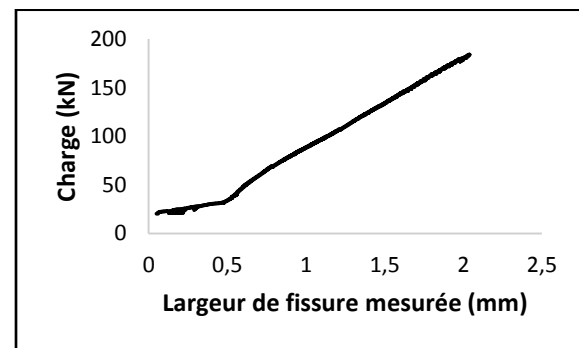


Figure 5.86: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutre A6-2

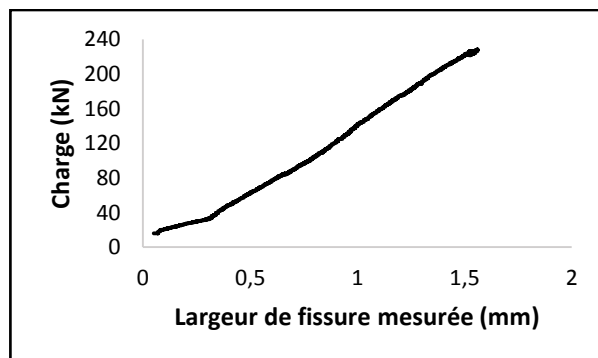


Figure 5.87: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutre A8-1

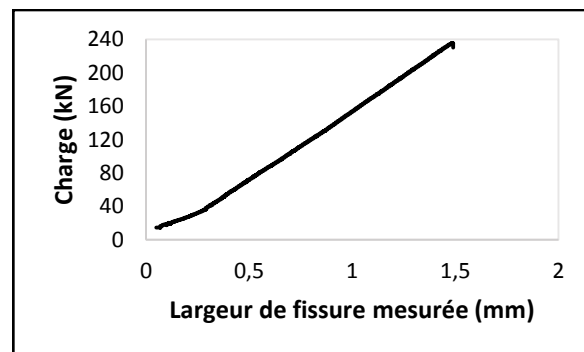


Figure 5.88: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutre A8-2

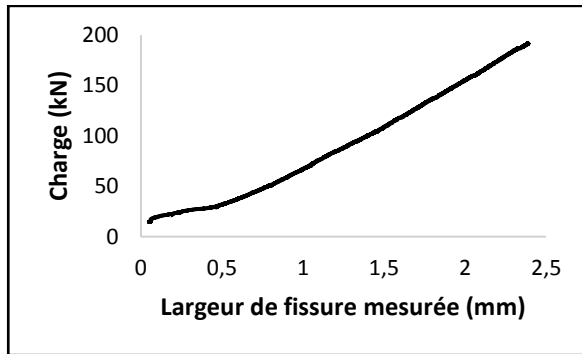


Figure 5.89: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutre P5-1

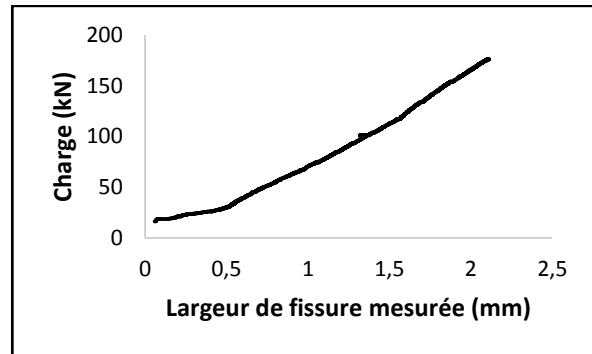


Figure 5.90: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutre P5-2

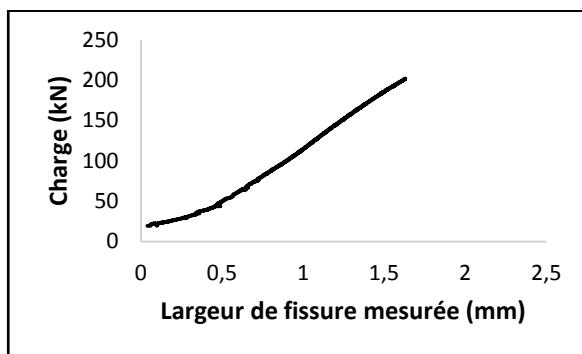


Figure 5.91: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutre P6-1

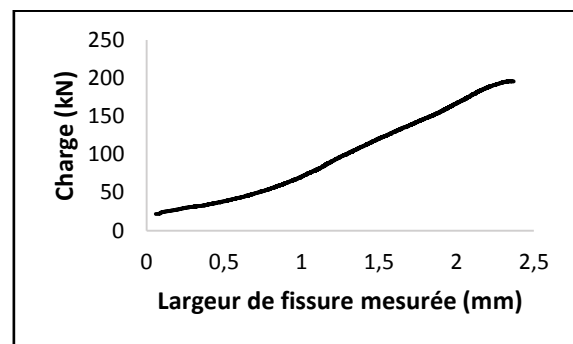


Figure 5.92: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutre P6-2

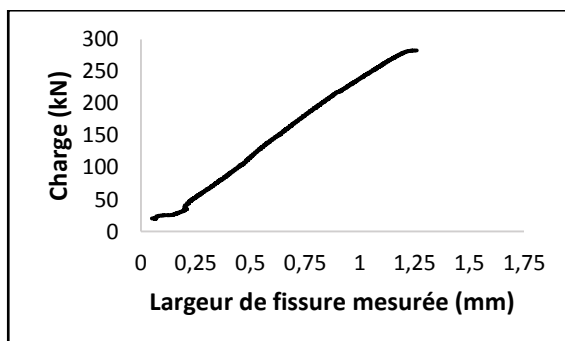


Figure 5.93: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutre P8-1

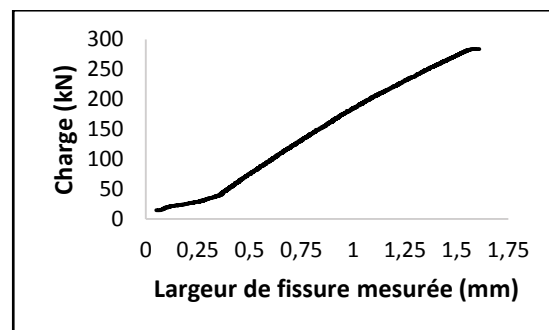


Figure 5.94: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutre P8-2

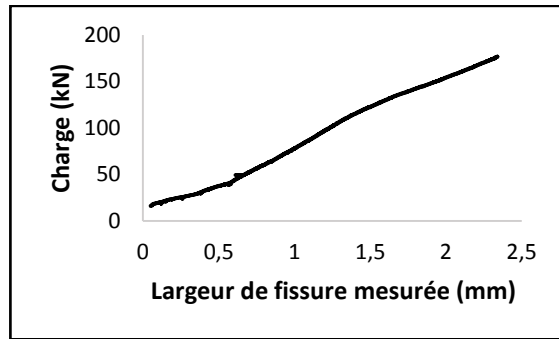


Figure 5.95: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutre C5-1

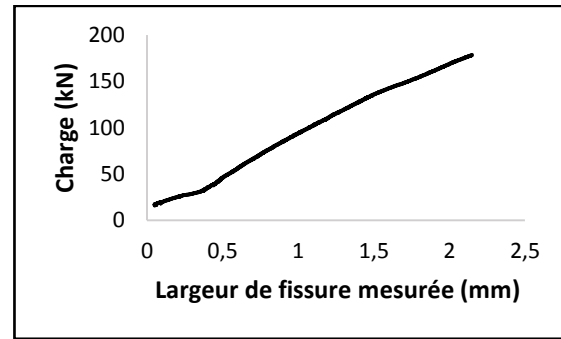


Figure 5.96: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutre C5-2

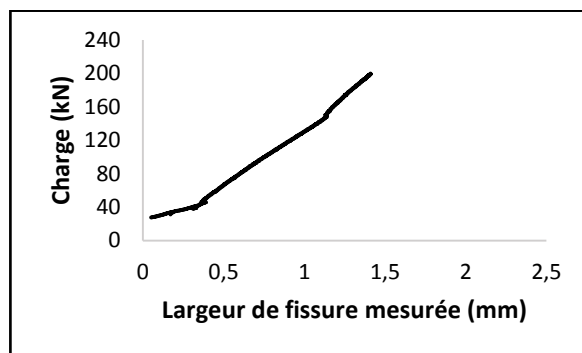


Figure 5.97: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutre C6-1

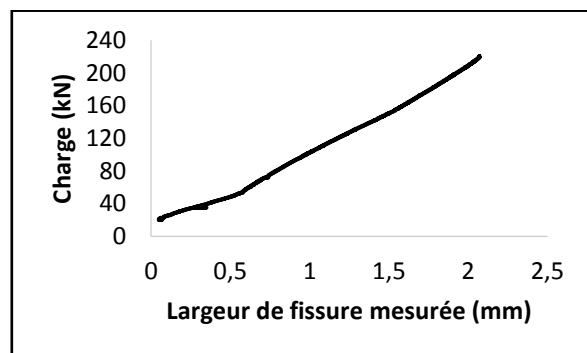


Figure 5.98: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutre C6-2

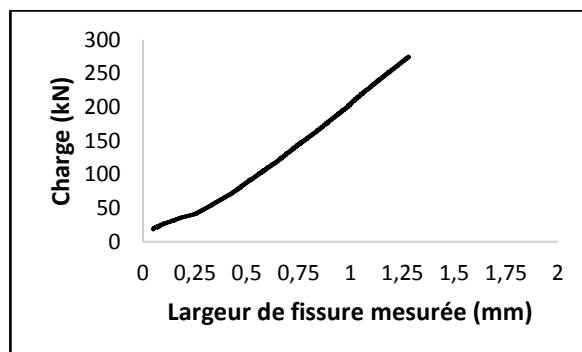


Figure 5.99: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutre C8-1

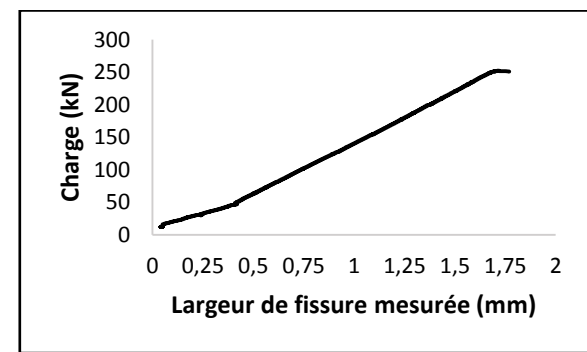


Figure 5.100: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutre C8-2

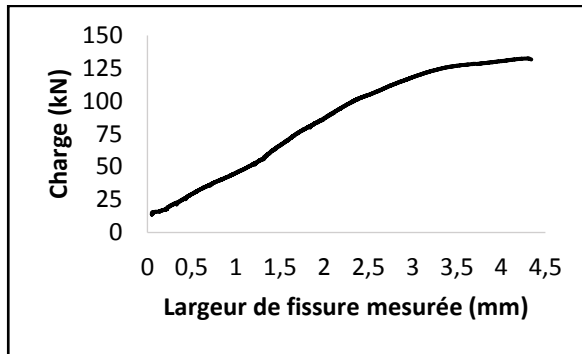


Figure 5.101: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutre M5-1

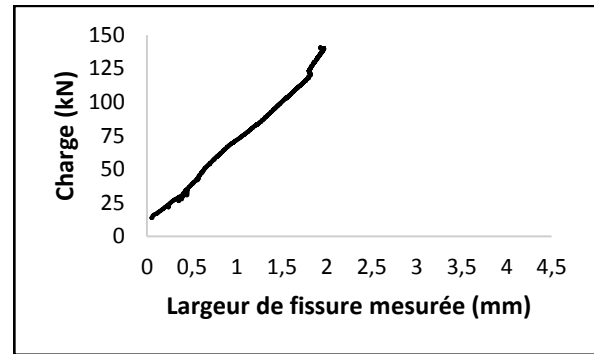


Figure 5.102: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutre M5-2

D'après ces graphiques, on observe donc la progression des largeurs de fissure pour toutes les poutres. Les trois graphiques suivants comprennent les courbes des largeurs de fissure des poutres renforcées par les barres d'armature de diamètre nominal 15 mm, 20 mm et 25 mm respectivement afin de comparer les largeurs de fissure apparaissant sur les poutres renforcées par des barres d'armature de même diamètre.

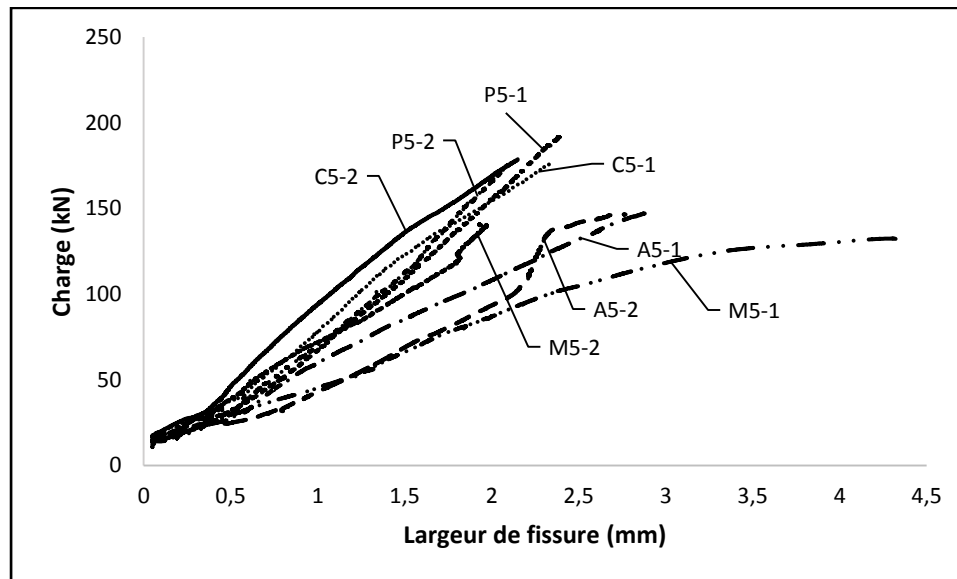


Figure 5.103: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutres renforcées avec des barres d'armature No. 5

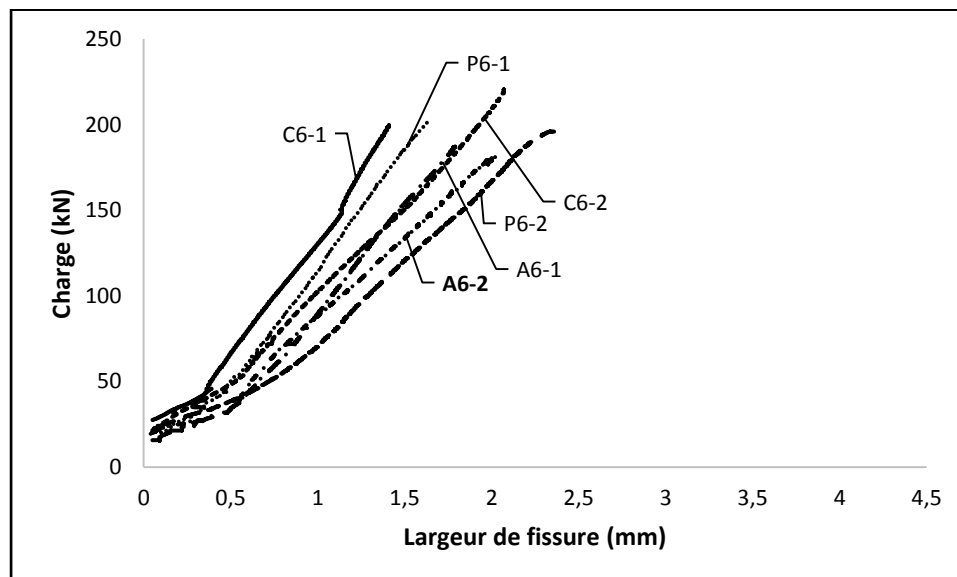


Figure 5.104: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée – Poutres renforcées avec des barres d'armature No. 6

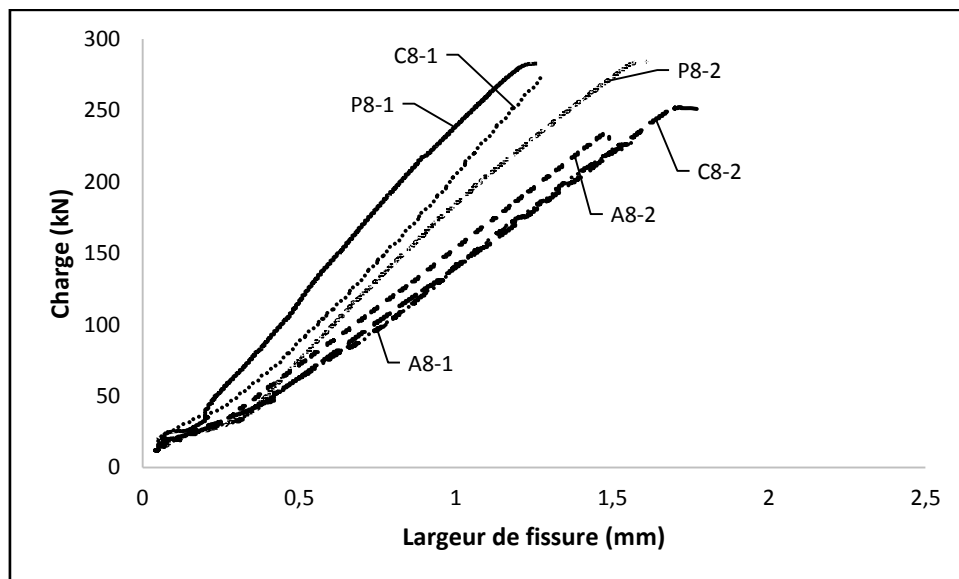


Figure 5.105: Charge en fonction de la largeur de fissure mesurée –
Poutres renforcées avec des barres d'armature No. 8

On remarque que les largeurs de fissure diminuent avec l'augmentation du diamètre des barres d'armature en PRFV dans les poutres ce qui reste cohérent.

- Pour les poutres renforcées avec des barres d'armature No. 5, les largeurs de fissure mesurées se situent en moyenne autour de 2,5 mm avec une exception pour les poutres M5-1 et M5-2 car celles-ci ont rompu par tension des barres;
- Pour les poutres renforcées avec des barres d'armature No. 6, les largeurs de fissure mesurées vont de 1,5 mm à 2,5 mm avec une moyenne située autour de 2,0 mm environ;
- Pour les poutres renforcées avec des barres d'armature No. 8, les largeurs de fissure sont encore plus faibles. En effet, elles vont de 1,25 à 1,75 mm avec une moyenne de 1,5 mm environ. Cela confirme que le diamètre des barres est un paramètre influençant les largeurs de fissure. Ce sont grâce à ces largeurs de fissure que les coefficients d'adhérence sont calculés pour chaque barre d'armature en PRFV.

5.2.4 Coefficients d'adhérence des barres d'armature en PRFV

L'objectif dans la réalisation et le test des vingt poutres est le calcul des coefficients d'adhérence des barres d'armature en PRFV. Ces coefficients d'adhérence ont été calculés selon la norme S6-14 grâce à la formule mentionnée dans le chapitre 2. Les coefficients d'adhérence calculés sont obtenus à 30% du moment de service maximal atteint puisque les résultats sont plus fiables

et cohérents en ce qui concerne les coefficients d'adhérence des barres en PRFV. Ainsi, la déformation des barres a été prise à 30% de M_s et la valeur la plus petite des largeurs de fissure parmi les deux ou trois mesures effectuées a été prise pour les calculs. La largeur de fissure ne doit pas excéder 0.7mm selon la norme CSA S806-12 pour les calculs, auquel cas la valeur de 0.7mm est prise pour les calculs. La largeur de fissure initiale est prise en compte dans les valeurs des différentes largeurs de fissure. Les valeurs des largeurs de fissure mesurées, avec les déformations des barres d'armature en PRFV à 30% du moment de service maximal et les coefficients d'adhérence calculés sont résumés dans le tableau suivant.

Poutres	Largeurs de fissure (mm)	Déformations mesurées à 30% de M_s ($\mu\epsilon$)	Coefficients d'adhérence des barres K_b	Moyenne des coefficients d'adhérence K_b
A5-1	0.70	238.98	0.880	0.9
A5-2	/	/	/	
A6-1	0.70	299.90	0.716	0.75
A6-2	0.68	263.26	0.792	
A8-1	0.53	184.18	0.881	0.9
A8-2	0.52	189.44	0.841	
P5-1	0.70	231.85	1.173	1.0
P5-2	0.70	328.28	0.829	
P6-1	0.59	277.87	0.841	0.9
P6-2	0.65	256.94	1.002	
P8-1	0.45	222.72	0.781	0.8
P8-2	0.55	269.14	0.791	
C5-1	0.59	237.49	0.905	1.0
C5-2	0.70	252.24	1.011	
C6-1	0.64	282.13	0.990	1.0
C6-2	0.70	285.08	1.064	
C8-1	0.48	222.23	0.832	1.0
C8-2	0.56	198.42	1.087	
M5-1	0.70	265.18	0.922	0.9
M5-2	0.70	258.30	0.947	

Tableau 5.11: Coefficients d'adhérence des barres d'armature en PRFV

Les coefficients d'adhérence sont calculés pour chaque barre d'armature. On remarque qu'il y a beaucoup de valeurs inférieures à 1 ce qui est relativement bien pour les barres d'armature en PRFV.

- Les barres d'armature Aslan : les barres d'armature de diamètre nominal 15 et 20 mm ont un coefficient d'adhérence inférieur à 0,9 et les barres d'armature de diamètre nominal 25 mm ont un coefficient d'adhérence inférieur à 0.8;
- les barres d'armature V-ROD :
 - les barres d'armature de diamètre nominal 15 mm ont un coefficient d'adhérence de 1;
 - les barres d'armature de diamètre nominal 20 mm ont un coefficient d'adhérence inférieur à 1;
 - les barres d'armature de diamètre nominal 25 mm ont un coefficient d'adhérence inférieur à 0,8
- les barres d'armature ComBAR : les coefficients d'adhérence restent aux alentours de 1;
- les barres d'armature MSTBAR : les coefficients d'adhérence sont inférieurs à 1.

Ces coefficients d'adhérence calculés montrent qu'ils sont bien différents de ceux que l'on peut trouver dans les normes actuelles et on peut remarquer que chaque barre a un coefficient d'adhérence différent selon le type de surface, le diamètre, etc.

CHAPITRE 6 ESSAIS D'ARRACHEMENT

Ce chapitre concerne les essais d'arrachement des barres d'armatures en PRFV. Nous allons voir les calculs des contraintes d'adhérence des barres d'armatures en PRFV pour chaque diamètre. Les résultats de chaque barre sont résumés dans ce chapitre.

6.1 Spécimens

Cinq spécimens par diamètre ont été testés (50 au total). La désignation des spécimens est comme suit : B# - *, avec B la lettre correspondant au manufacturier dont les barres ont été testées à l'arrachement, et # le numéro des barres d'armature (No. 5, 6 ou 8 pour notre cas correspondant à un diamètre nominal de 15, 20 ou 25 mm) et * le numéro du spécimen (de 1 à 5). Ces spécimens ont tous eu une longueur d'ancrage de cinq fois le diamètre nominal comme expliqué dans le chapitre 3. Ces longueurs d'ancrage sont donc de 75 mm, 100 mm et 125 mm pour les diamètres de barre 15 mm, 20 mm et 25 mm respectivement. Dans les résultats qui suivent, la contrainte normale de traction ainsi que la contrainte d'adhérence de chaque barre sont calculées. Ayant un LVDT permettant de mesurer le glissement des barres dans le béton, des graphiques seront illustrés montrant le glissement des barres en fonction de la charge. Seul un graphique par diamètre sera montré avec les courbes minimums et maximums obtenues.

6.2 Résultats expérimentaux

6.2.1 Contraintes d'adhérence

Les tableaux suivants résument les propriétés utilisées et calculées des essais d'arrachement. Un tableau résume la moyenne des valeurs calculées à la fin de ce chapitre et un graphique par diamètre montre le glissement des barres d'armature dans le béton avec le minimum et maximum des cinq essais.

Spécimens	Longueur d'ancrage (mm)	Charge maximale (kN)	Contrainte normale de traction (MPa)	Contrainte d'adhérence (MPa)
P5-1	75	55.53	314.39	15.72
P5-2	75	54.07	306.14	15.31
P5-3	75	70.48	399.05	19.95
P5-4	75	47.01	266.15	13.31
P5-5	75	73.56	416.49	20.82
Moyenne	/	60.13	340.45	17.02
SD	/	11.38	64.41	3.22
COV	/	18.92	94.60	3.78

Tableau 6.1: Contraintes d'adhérence P5

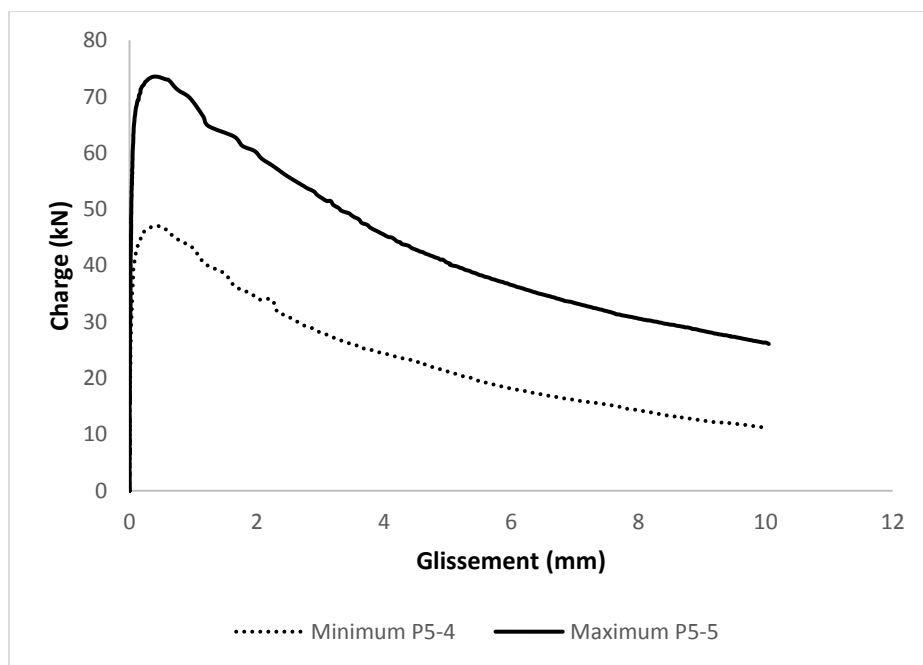


Figure 6.1: Charge en fonction du glissement – Spécimens P5



Figure 6.2: Barre P5

Spécimens	Longueur d'ancrage (mm)	Charge maximale (kN)	Contrainte normale de traction (MPa)	Contrainte d'adhérence (MPa)
P6-1	100	94.02	299.43	14.97
P6-2	100	75.96	241.89	12.09
P6-3	100	76.13	242.46	12.12
P6-4	100	91.24	290.56	14.53
P6-5	100	88.17	280.79	14.04
Moyenne	/	85.10	271.03	13.55
SD	/	8.52	27.14	1.36
COV	/	10.02	10.02	10.02

Tableau 6.2: Contraintes d'adhérence P6

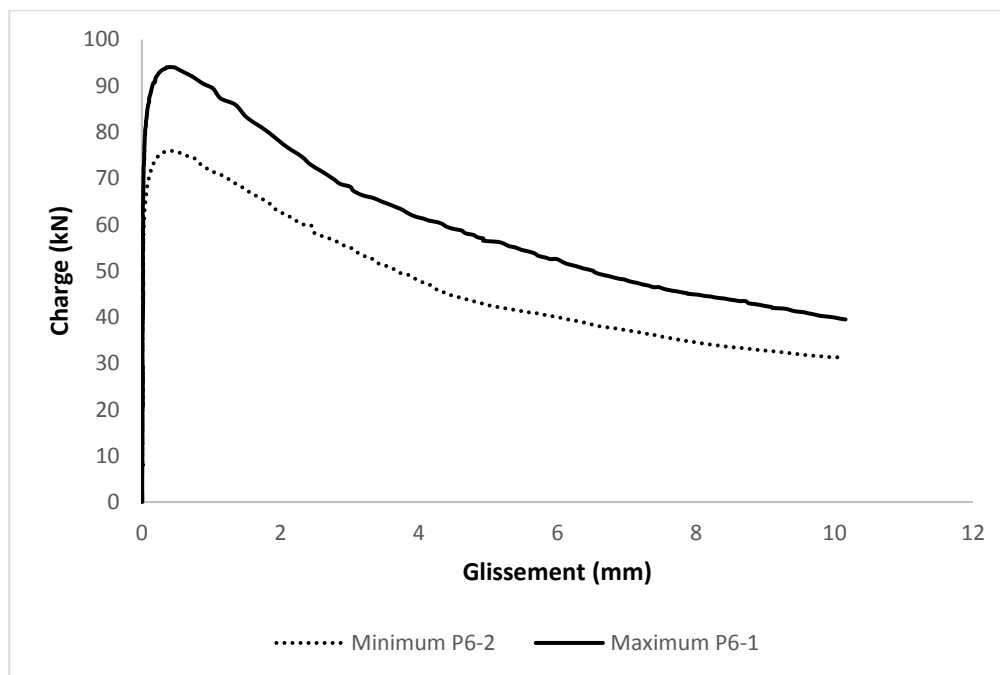


Figure 6.3: Charge en fonction du glissement – Spécimens P6



Figure 6.4: Barre P6

Spécimens	Longueur d'ancrage (mm)	Charge maximale (kN)	Contrainte normale de traction (MPa)	Contrainte d'adhérence (MPa)
P8-1	125	84.11	171.43	8.57
P8-2	125	133.30	271.69	13.58
P8-3	125	122.88	250.46	12.52
P8-4	125	111.38	227.02	11.35
P8-5	125	133.29	271.67	13.58
Moyenne	/	116.99	238.45	11.92
SD	/	20.49	41.76	2.09
COV	/	17.51	17.51	17.51

Tableau 6.3: Contraintes d'adhérence P8

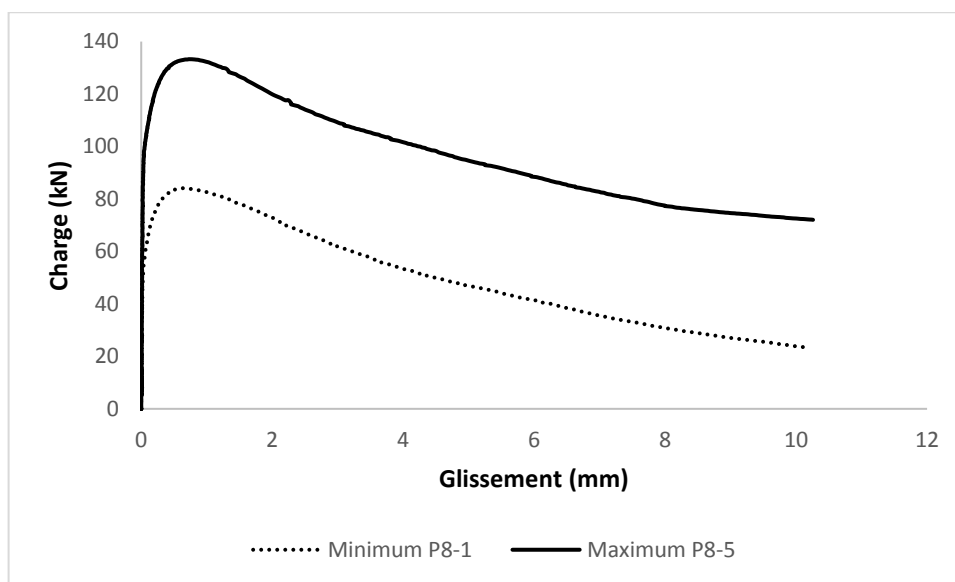


Figure 6.5: Charge en fonction du glissement – Spécimens P8



Figure 6.6: Barre P8

Spécimens	Longueur d'ancrage (mm)	Charge maximale (kN)	Contrainte normale de traction (MPa)	Contrainte d'adhérence (MPa)
A5-1	75	54.90	310.81	15.54
A5-2	75	49.56	280.60	14.03
A5-3	75	58.23	329.66	16.48
A5-4	75	68.12	385.68	19.28
A5-5	75	47.392	268.32	13.42
Moyenne	/	55.64	315.01	15.75
SD	/	8.18	46.34	2.32
COV	/	14.71	14.71	14.71

Tableau 6.4: Contraintes d'adhérence A5

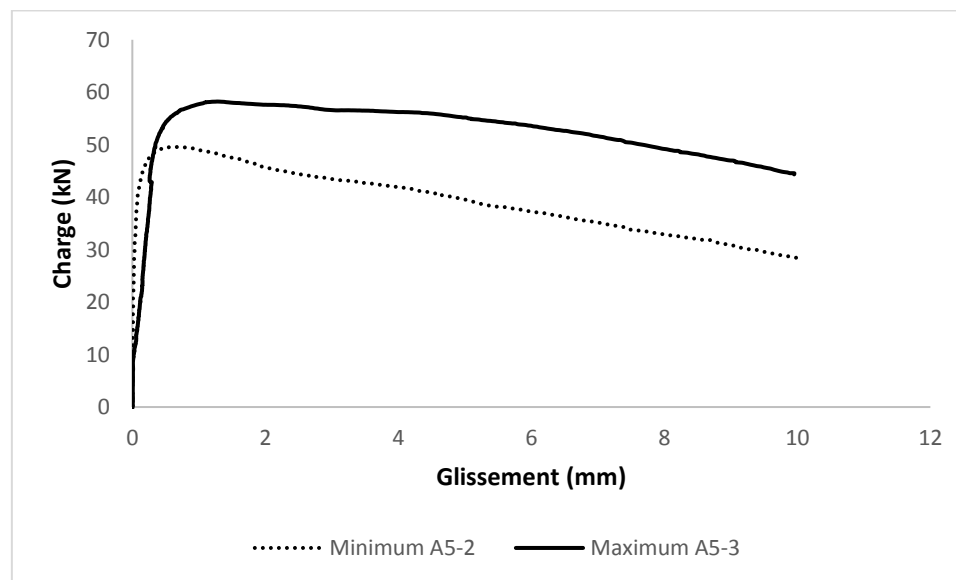


Figure 6.7: Charge en fonction du glissement – Spécimens A5



Figure 6.8: Barre A5

Spécimens	Longueur d'ancrage (mm)	Charge maximale (kN)	Contrainte normale de traction (MPa)	Contrainte d'adhérence (MPa)
A6-1	100	111.22	354.20	17.71
A6-2	100	104.87	333.98	16.70
A6-3	100	106.17	338.12	16.91
A6-4	100	122.44	398.94	19.50
A6-5	100	110.82	352.93	17.65
Moyenne	/	111.10	353.83	17.69
SD	/	6.92	22.05	1.10
COV	/	6.23	6.23	6.23

Tableau 6.5: Contraintes d'adhérence A6

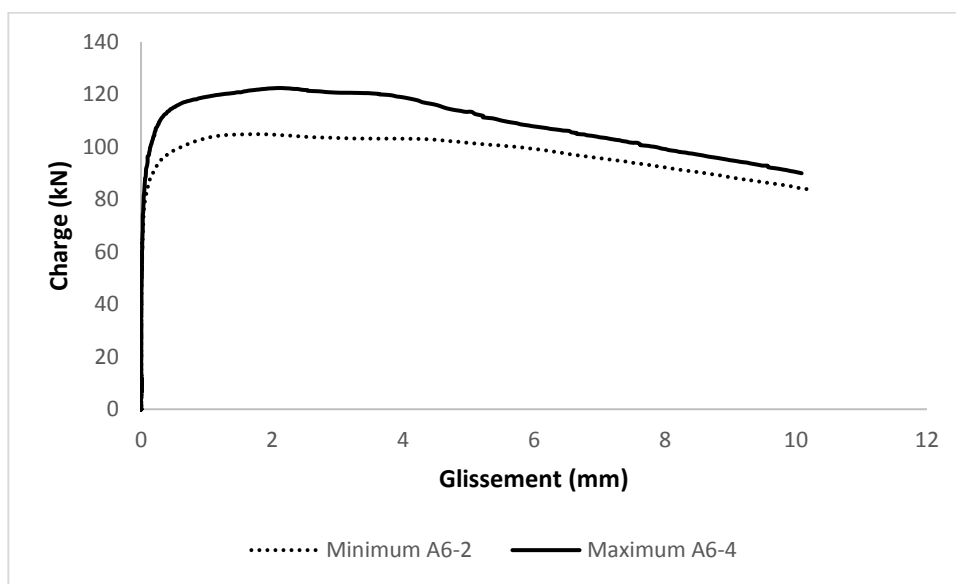


Figure 6.9: Charge en fonction du glissement – Spécimens A6

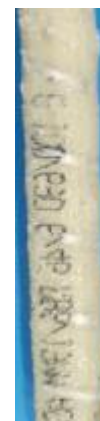


Figure 6.10: Barre A6

Spécimens	Longueur d'ancrage (mm)	Charge maximale (kN)	Contrainte normale de traction (MPa)	Contrainte d'adhérence (MPa)
A8-1	125	152.09	309.99	15.50
A8-2	125	149.69	305.10	15.26
A8-3	125	141.44	288.29	14.41
A8-4	125	147.14	299.90	15.00
A8-5	125	155.17	316.27	15.81
Moyenne	/	149.11	303.91	15.20
SD	/	5.21	10.62	0.53
COV	/	3.50	3.50	3.50

Tableau 6.6: Contraintes d'adhérence A8

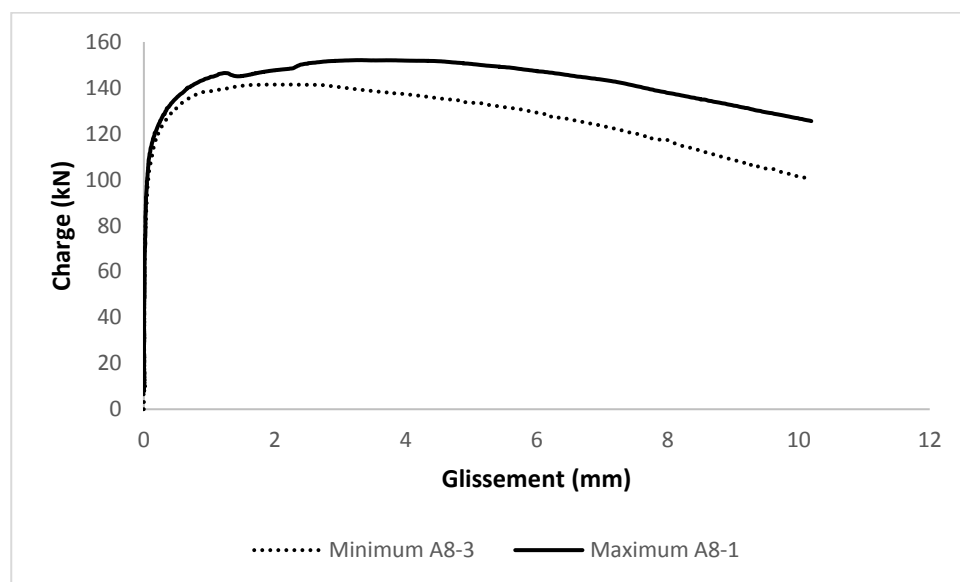


Figure 6.11: Charge en fonction du glissement – Spécimens A8



Figure 6.12: Barre A8

Spécimens	Longueur d'ancrage (mm)	Charge maximale (kN)	Contrainte normale de traction (MPa)	Contrainte d'adhérence (MPa)
C5-1	75	76.45	432.85	21.64
C5-2	75	68.06	385.32	19.27
C5-3	75	41.89	237.19	11.86
C5-4	75	57.19	323.78	16.19
C5-5	75	52.23	295.72	14.79
Moyenne	/	59.16	334.97	16.75
SD	/	13.49	76.39	3.82
COV	/	22.81	22.81	22.81

Tableau 6.7: Contraintes d'adhérence C5

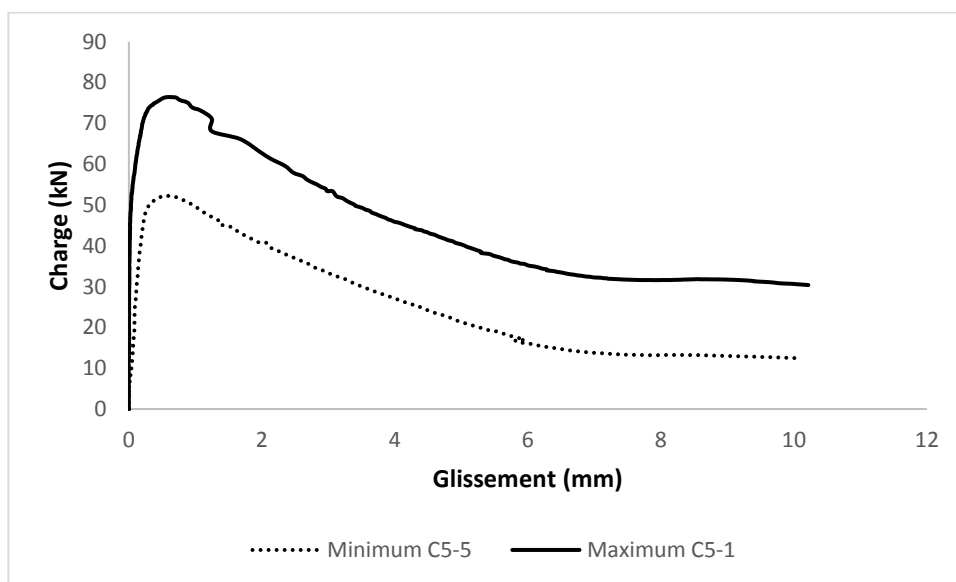


Figure 6.13: Charge en fonction du glissement – Spécimens C5



Figure 6.14: Barre C5

Spécimens	Longueur d'ancrage (mm)	Charge maximale (kN)	Contrainte normale de traction (MPa)	Contrainte d'adhérence (MPa)
C6-1	100	85.15	271.18	13.56
C6-2	100	87.43	278.45	13.92
C6-3	100	92.81	295.56	14.78
C6-4	100	98.44	313.50	15.68
C6-5	100	100.05	318.63	15.93
Moyenne	/	92.78	295.46	14.77
SD	/	6.55	20.86	1.04
COV	/	7.06	7.06	7.06

Tableau 6.8: Contraintes d'adhérence C6

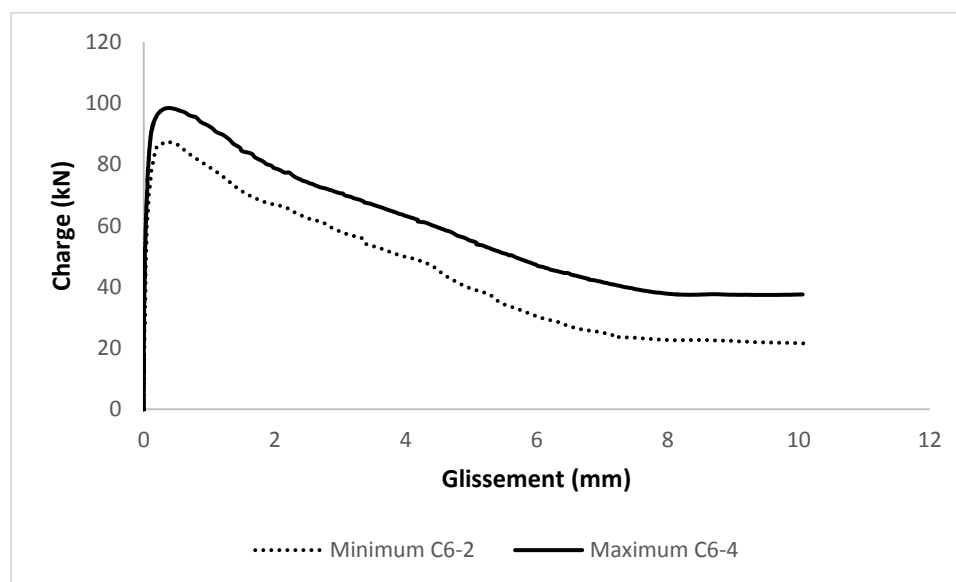


Figure 6.15: Charge en fonction du glissement – Spécimens C6



Figure 6.16: Barre C6

Spécimens	Longueur d'ancrage (mm)	Charge maximale (kN)	Contrainte normale de traction (MPa)	Contrainte d'adhérence (MPa)
C8-1	125	156.18	318.33	15.92
C8-2	125	132.97	271.02	13.55
C8-3	125	145.43	296.42	14.82
C8-4	125	134.9	274.96	13.75
C8-5	125	133.99	273.10	13.66
Moyenne	/	140.69	286.76	14.34
SD	/	10.00	20.39	1.02
COV	/	7.11	7.11	7.11

Tableau 6.9: Contraintes d'adhérence C8

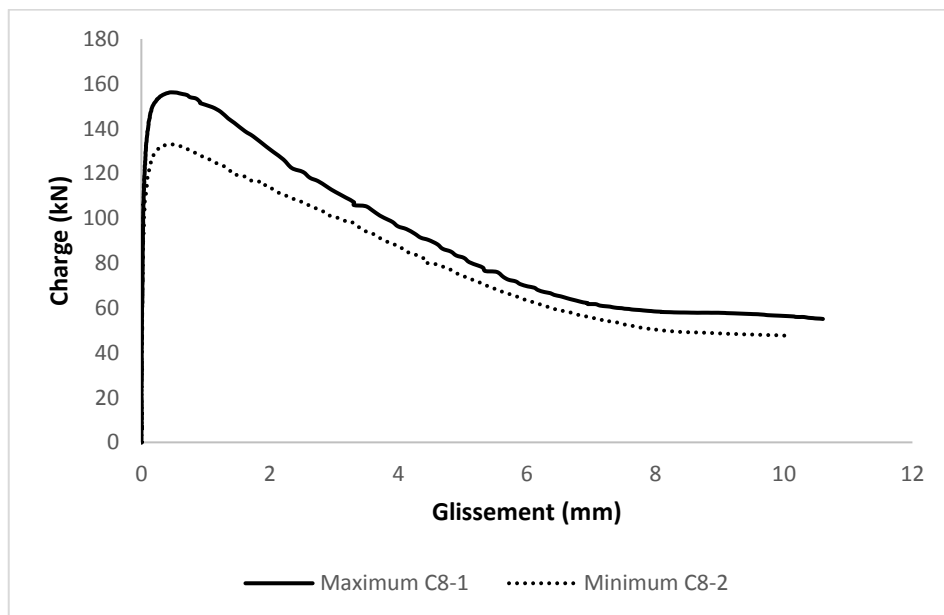


Figure 6.17: Charge en fonction du glissement – Spécimens C8



Figure 6.18: Barre C8

On peut apercevoir sur la figure 6.19 l'effet du glissement sur chaque barre après l'essai d'arrachement. On remarque assez aisément que les barres ont glissé dans les blocs en béton.

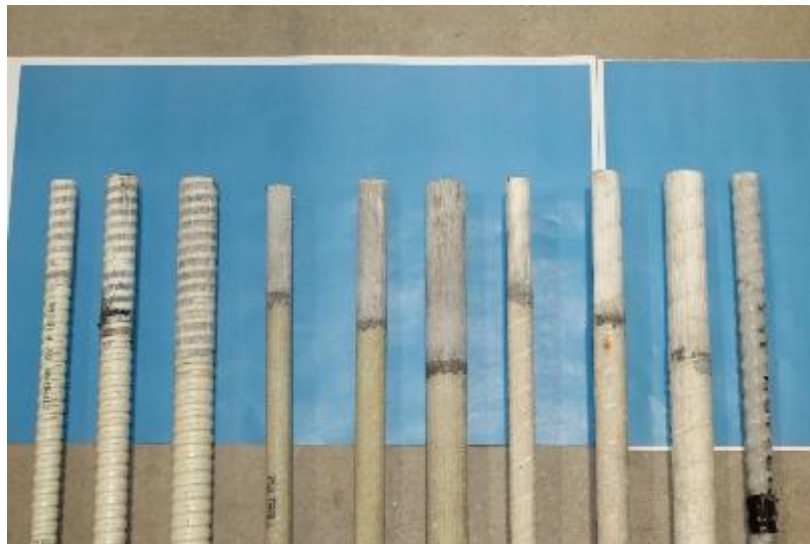


Figure 6.19: Vue d'ensemble des barres en PRFV après les essais d'arrachement

Le tableau ci-après résume les résultats obtenus pour toutes les barres, ce qui permet de visualiser les contraintes d'adhérence obtenues pour chaque barre.

Spécimens	Charge maximale (kN)	Contrainte normale de traction (MPa)	Contrainte d'adhérence (MPa)
P5	60.13	340.45	17.0
P6	85.10	271.03	13.5
P8	116.99	238.45	11.9
A5	55.64	315.01	15.7
A6	111.10	353.83	17.7
A8	149.11	303.91	15.2
C5	59.16	334.97	16.7
C6	92.78	295.46	14.8
C8	140.69	286.76	14.3

Tableau 6.10: Résumé contraintes d'adhérence

Les barres du même manufacturier, quel que soit le diamètre, ont plus ou moins le même comportement au niveau du glissement, c'est ce qui est observé sur les différentes courbes ci-haut. Néanmoins, pour une barre No. 5 par exemple, le glissement des barres n'est pas le même entre les manufacturiers. Cela est visible également pour les barres No. 6 et No. 8.

Pour ce qui est des contraintes d'adhérence, on peut remarquer que le diamètre des barres en PRFV influe peu sur celles-ci. Quel que soit le diamètre des barres en PRFV, les contraintes d'adhérence restent du même ordre de grandeur.

6.2.2 Investigation du coefficient d'adhérence k_b

Les courbes obtenues précédemment ont une pente pouvant être considérée comme le module de rigidité obtenu de la relation contrainte - déformation. Cette valeur a un effet important sur les largeurs des principales fissures de flexion en béton armé. Ce module K a été calculé pour chaque courbe. Le tableau ci-après donne la moyenne de K calculée.

Spécimens	K (GPa)
P5	17.29
P6	8.48
P8	11.12
A5	10.37
A6	7.58
A8	14.60
C5	14.76
C6	14.79
C8	15.84

Tableau 6.11: Valeurs de K

La corrélation entre les valeurs de K trouvée et les coefficients d'adhérence calculés après avoir effectué les essais des poutres a été étudiée dans les courbes suivantes.

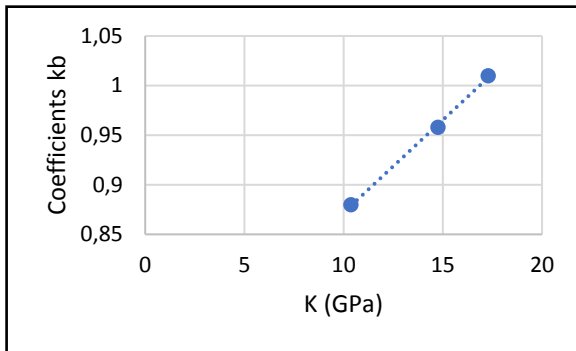


Figure 6.20: Coefficients k_b vs K pour les barres No. 5

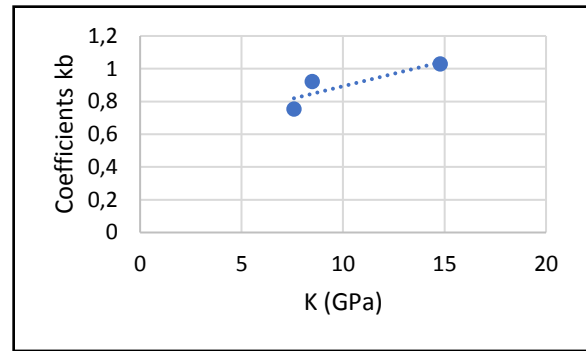


Figure 6.21: Coefficients k_b vs K pour les barres No. 6

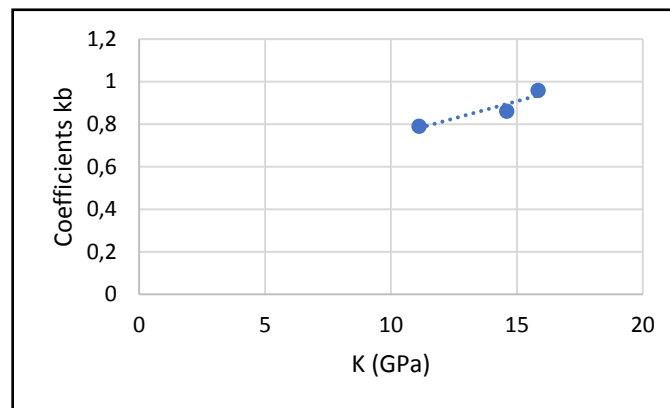


Figure 6.22: Coefficients k_b vs K pour les barres No. 8

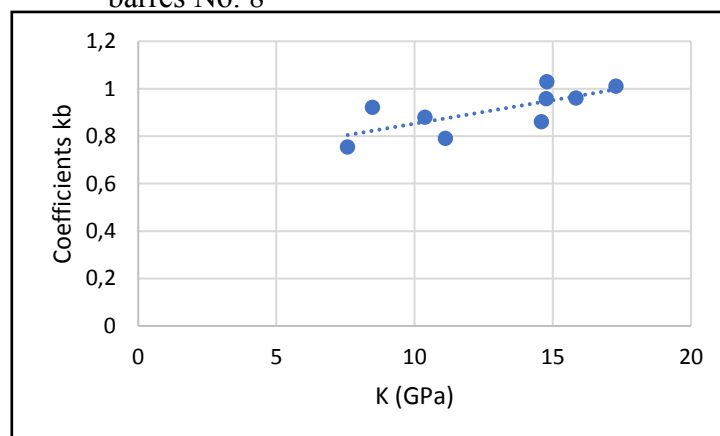


Figure 6.23: Coefficients k_b vs K pour tous les diamètres

Une corrélation semble donc être faite entre ces paramètres au vu des courbes obtenues mais pour avoir plus de précisions et d'exactitudes quant à cette corrélation, d'autres recherches doivent être menées.

CHAPITRE 7 ESSAIS DES PRISMES

Ce chapitre concerne les résultats expérimentaux des essais des prismes en tension pure. Nous allons voir dans ce chapitre les résultats liés aux calculs de résistance du béton, les modes de rupture de chaque prisme, certaines courbes liant la charge à l'élongation des prismes ainsi que les courbes liant les largeurs de fissure à l'élongation des prismes, et les calculs des coefficients d'adhérence avec ces essais seront étudiés.

7.1 Rupture des prismes

Les prismes ont été testés en traction afin d'étudier l'adhérence des barres et de pouvoir calculer les coefficients d'adhérence des barres d'armature en PRFV. La rupture des prismes peut être observée sur les figures ci-après, après rupture de ceux-ci. Les tests ont été stoppés à environ 80% de la charge maximale admissible par les barres d'armature en PRFV afin d'éviter un éclatement total du béton.



Figure 7.1: Prisme PR-P5 après rupture



Figure 7.2: Prisme PR-A5 après rupture



Figure 7.3: Prisme PR-C5 après rupture



Figure 7.4: Prisme PR-P6 après rupture



Figure 7.5: Prisme PR-A6 après rupture



Figure 7.6: Prisme PR-C6 après rupture

Pour l'ensemble des prismes, les figures qui sont apparues sont similaires au vu des résultats obtenus après les tests. Les espacements entre les fissures sont différents selon chaque prisme et ceci s'explique par l'adhérence des barres qui varie selon le manufacturier, le diamètre. Étant donné l'arrêt des tests à 80% de la charge maximale à la rupture des barres en PRFV, aucun prisme n'a eu de rupture par éclatement du béton.

Les fissures qui apparaissent sur les prismes sont également visibles sur les figures suivantes. Un réseau de fissure a été réalisé afin de bien visualiser l'apparition de celles-ci sur les prismes.

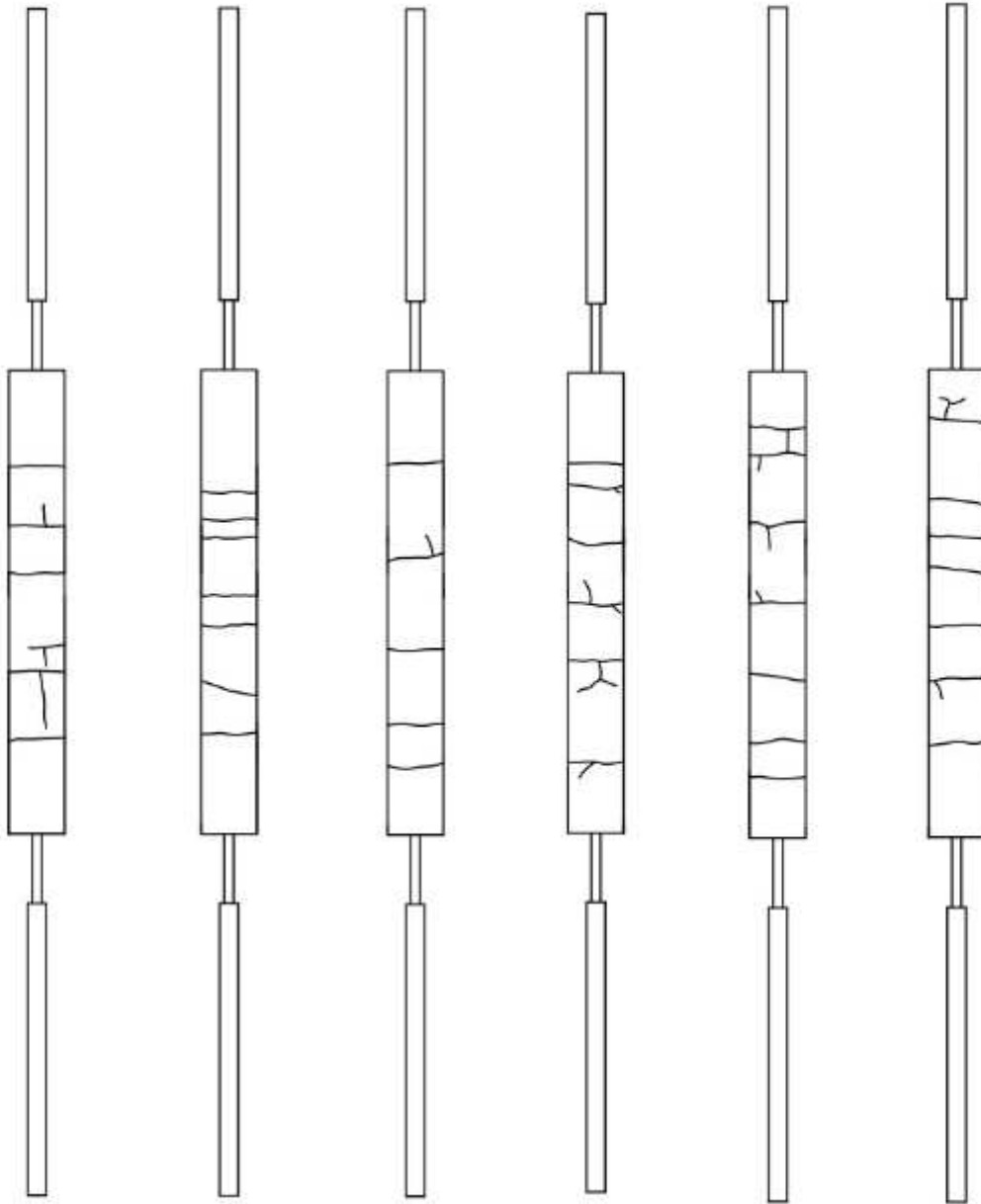


Figure 7.7:
Réseau de
fissures –
PR-P5

Figure 7.8:
Réseau de
fissures –
PR-A5

Figure 7.9:
Réseau de
fissures –
PR-C5

Figure 7.10:
Réseau de
fissures –
PR-P6

Figure 7.11:
Réseau de
fissures –
PR-A6

Figure 7.12:
Réseau de
fissures –
PR-C6

7.2 Résultats expérimentaux

Les prismes testés ont été renforcés par des barres d'armature No. 5 et 6. Six prismes ont été testés au total. Le tableau qui suit est un résumé des propriétés des barres utilisées ainsi que le ratio de renforcement. Les figures suivantes montrent les courbes charge-élongation, largeur de fissure-élongation et contrainte-déformation qui proviennent des résultats des tests. Les courbes contrainte-déformation ont été calculées en utilisant les données des courbes charge-élongation. Les déformations déterminées sont celles correspondant aux déformations des prismes.

Désignation des échantillons	Ratio de renforcement (%)	Diamètre nominal (mm)	E (GPa)	Déformation ultime (%)
PR-P5	1.27	15	60.59	2.31
PR-A5	1.27	15	44.00	2.23
PR-C5	1.27	15	58.50	2.26
PR-P6	1.82	20	65.05	2.10
PR-A6	1.82	20	47.06	2.02
PR-C6	1.82	20	61.76	2.05

Tableau 7.1: Propriété des barres des prismes

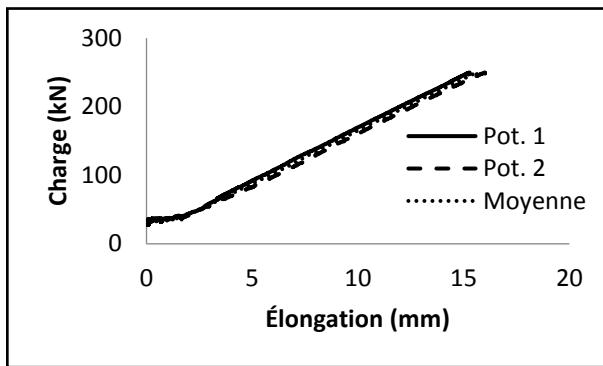


Figure 7.13: Charge en fonction de l'élongation - PR-P5

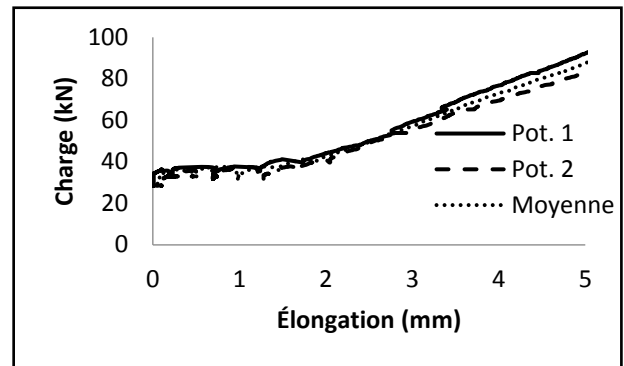


Figure 7.14: Vue rapprochée – Charge en fonction de l'élongation – PR-P5

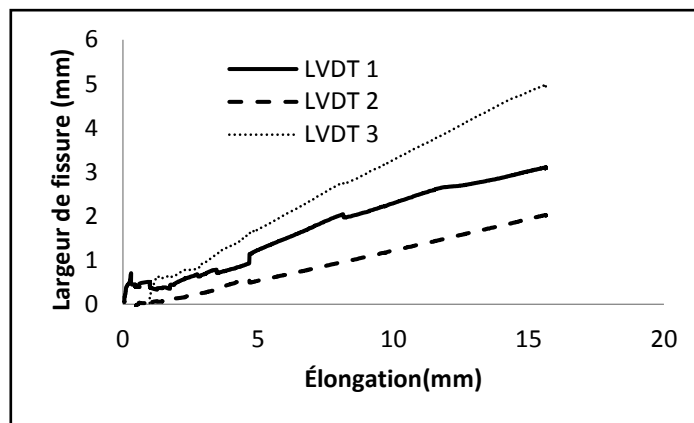


Figure 7.15: Largeur de fissure en fonction de l'élongation - PR-P5

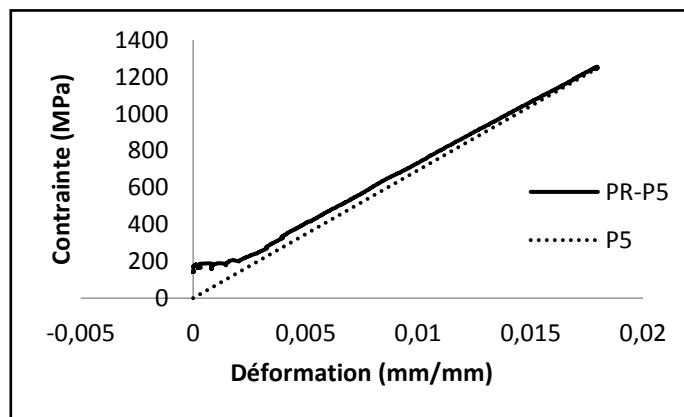


Figure 7.16: Contrainte en fonction de la déformation - PR-P5

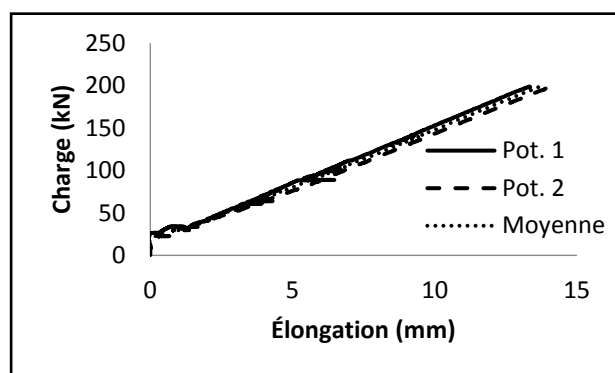


Figure 7.17: Charge en fonction de l'élongation - PR-C5

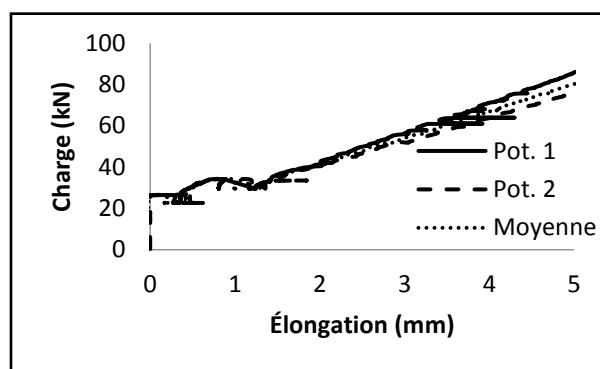


Figure 7.18: Vue rapprochée – Charge en fonction de l'élongation – PR-C5

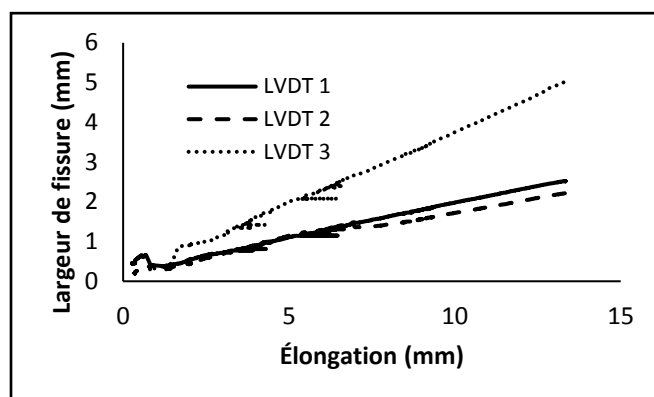


Figure 7.19: Largeur de fissure en fonction de l'élongation - PR-C5

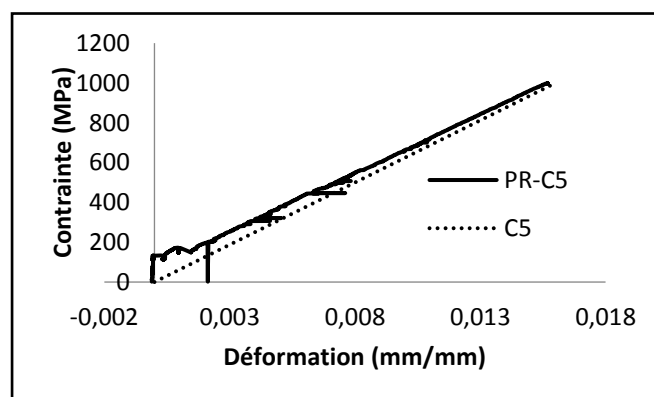


Figure 7.20: Contrainte en fonction de la déformation - PR-C5

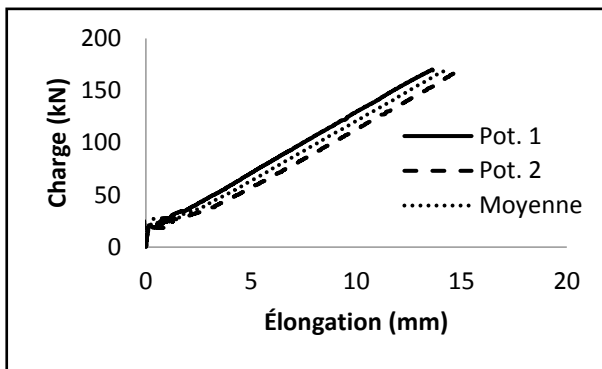


Figure 7.21: Charge en fonction de l'élongation - PR-A5

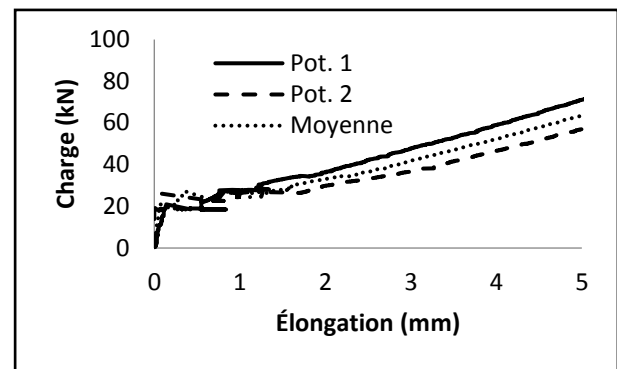


Figure 7.22: Vue rapprochée - Charge en fonction de l'élongation - PR-A5

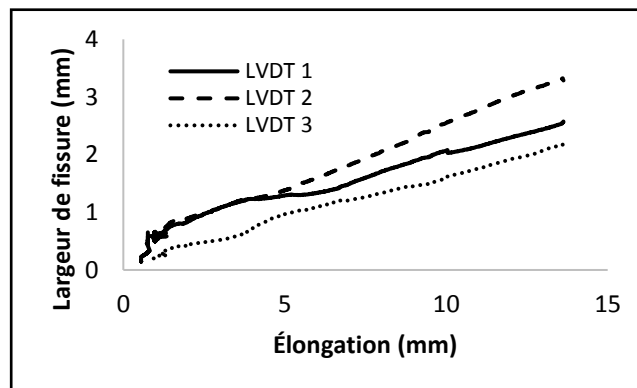


Figure 7.23: Largeur de fissure en fonction de l'élongation - PR-A5

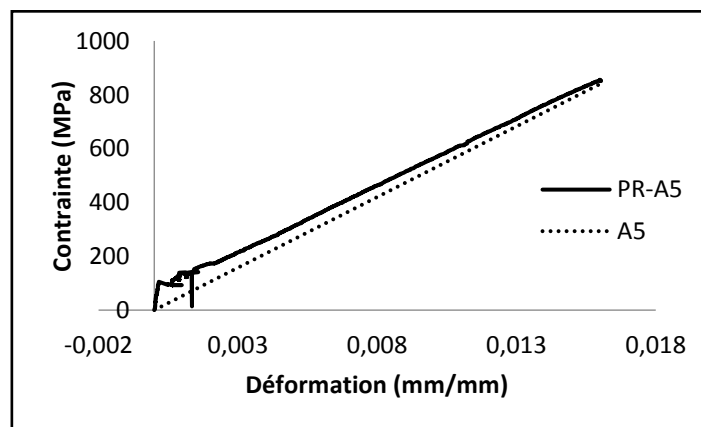


Figure 7.24: Contrainte en fonction de la déformation - PR-A5

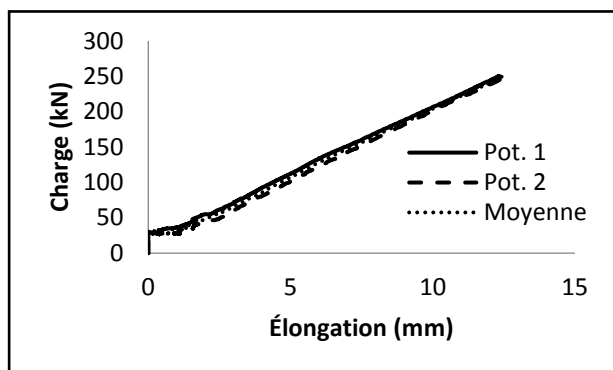


Figure 7.25: Charge en fonction de l'élongation - PR-P6

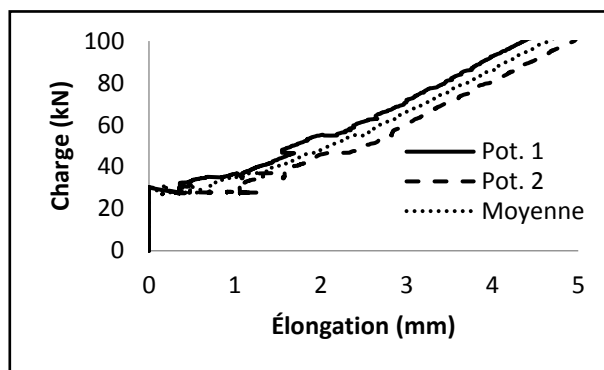


Figure 7.26: Vue rapprochée - Charge en fonction de l'élongation - PR-P6

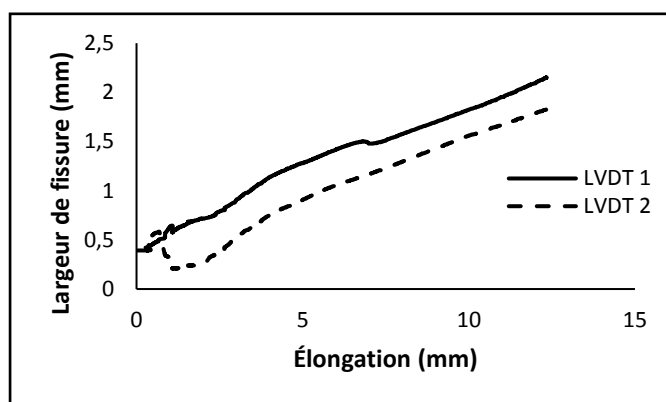


Figure 7.27: Largeur de fissure en fonction de l'élongation - PR-P6

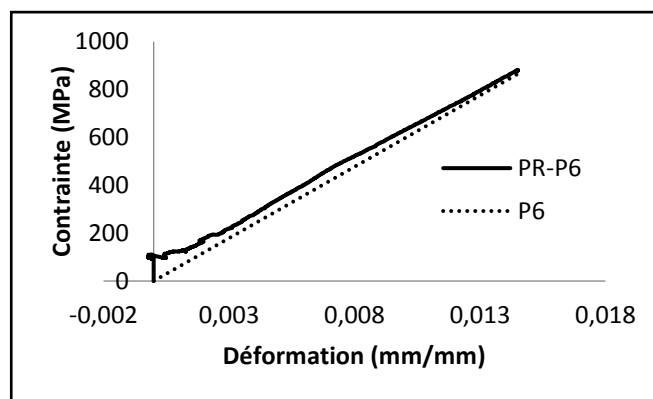


Figure 7.28: Contrainte en fonction de la déformation - PR-P6

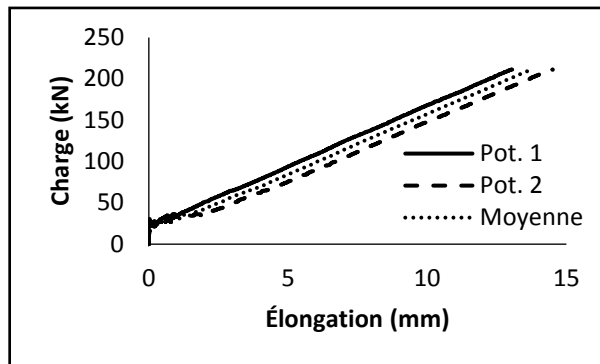


Figure 7.29: Charge en fonction de l'élongation - PR-A6

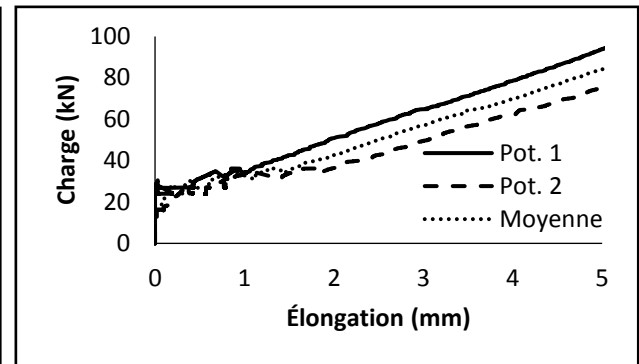


Figure 7.30: Vue rapprochée - Charge en fonction de l'élongation - PR-A6

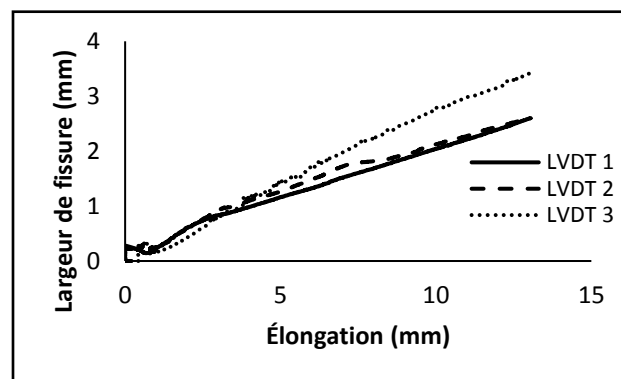


Figure 7.31: Largeur de fissure en fonction de l'élongation - PR-A6

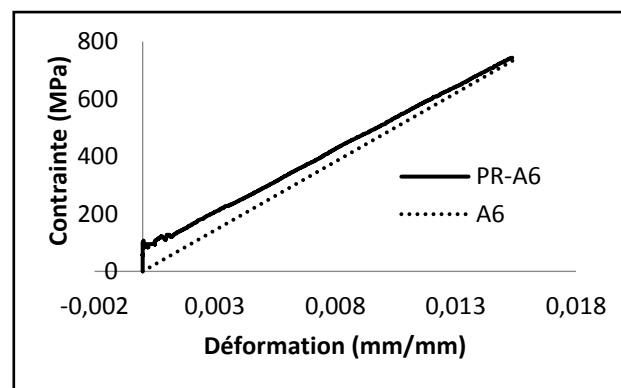


Figure 7.32: Contrainte en fonction de la déformation - PR-A6

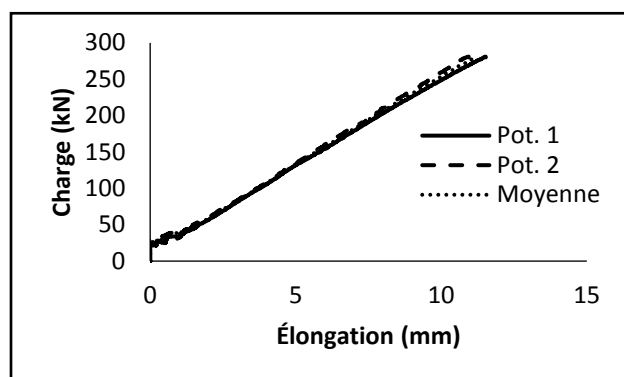


Figure 7.33: Charge en fonction de l'élongation - PR-C6

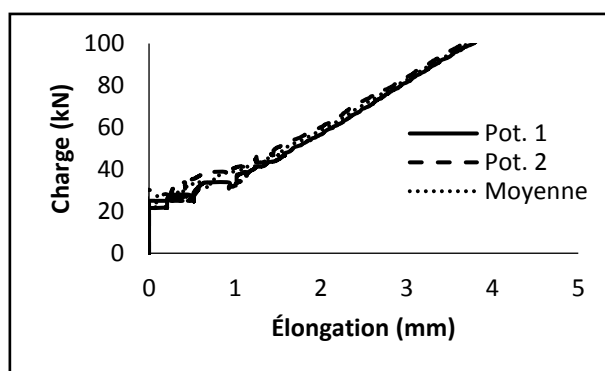


Figure 7.34: Vue rapprochée - Charge en fonction de l'élongation - PR-C6

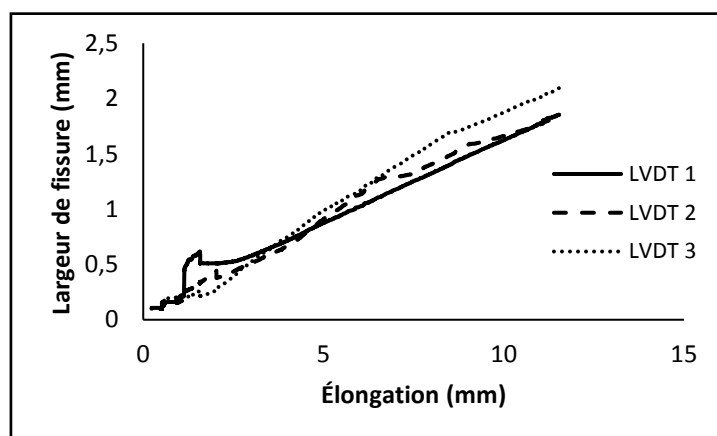


Figure 7.35: Largeur de fissure en fonction de l'élongation - PR-C6

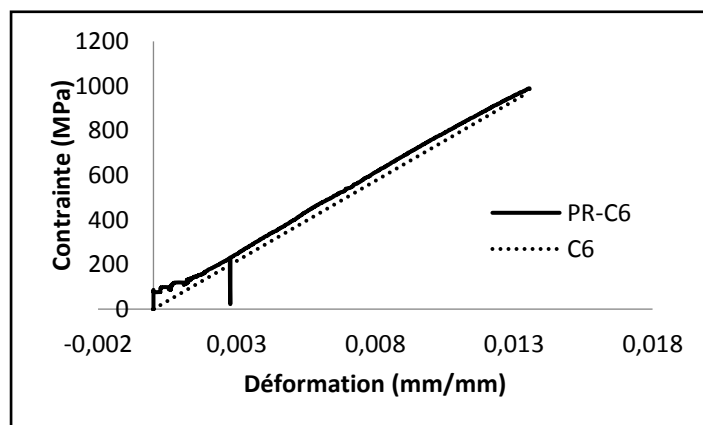


Figure 7.36: Contrainte en fonction de la déformation - PR-C6

Les coefficients d'adhérence des barres d'armature en PRFV ont été investiguées également avec les tests des prismes. Une méthode pour effectuer le calcul des coefficients d'adhérence a été d'utiliser la même formule qui a été utilisée lors des tests avec les poutres car la portée entre les appuis des poutres était de 1m, et la longueur des prismes choisie était de 1m également. Ce choix a été effectué dans le but de pouvoir calculer les coefficients k_b dans des conditions similaires aux poutres, sachant qu'il n'y a pas d'effets de cisaillement entre les appuis des poutres. Les prismes se comportaient donc de façon similaire aux poutres sur la longueur de la portée. Dans les normes, si la largeur de fissure dépasse 0,7 mm, la valeur à prendre est 0,7 mm. Dans ce cas, la valeur la plus élevée sous 0,7 mm de largeur de fissure a été prise. Les valeurs des largeurs de fissure ont été prises à 30% de la charge maximale à la rupture des barres d'armature en PRFV (valeurs déterminées lorsque les essais en traction des barres ont été faits) comme pour les calculs des coefficients d'adhérence des barres en PRFV après avoir testé les poutres. Le tableau 7.2 résume les valeurs trouvées lors de ces calculs

	PR - P5	PR- C5	PR-A5	PR - P6	PR - A6	PR - C6
P_{30%} (kN)	98.0	94.3	72.8	128.2	94.7	137.0
w (mm)	0.628	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Contrainte (Mpa)	420.8	397.3	293.6	409.6	284.4	379.8
E (Mpa)	71010	58500	44000	71670	47060	71760
k_b	1.0	1.0	1.0	1.2	1.1	1.3

Tableau 7.2: Coefficients d'adhérence - Prismes

On remarque que les coefficients d'adhérence calculés sont similaires à ceux calculés lors des essais des poutres pour les barres de diamètre nominal 15mm. Ils sont plus élevés pour des barres de diamètre nominal 20 mm. Une comparaison entre les coefficients d'adhérence calculés lors des essais des poutres et ceux calculés lors des essais des prismes est visible sur la figure suivante.

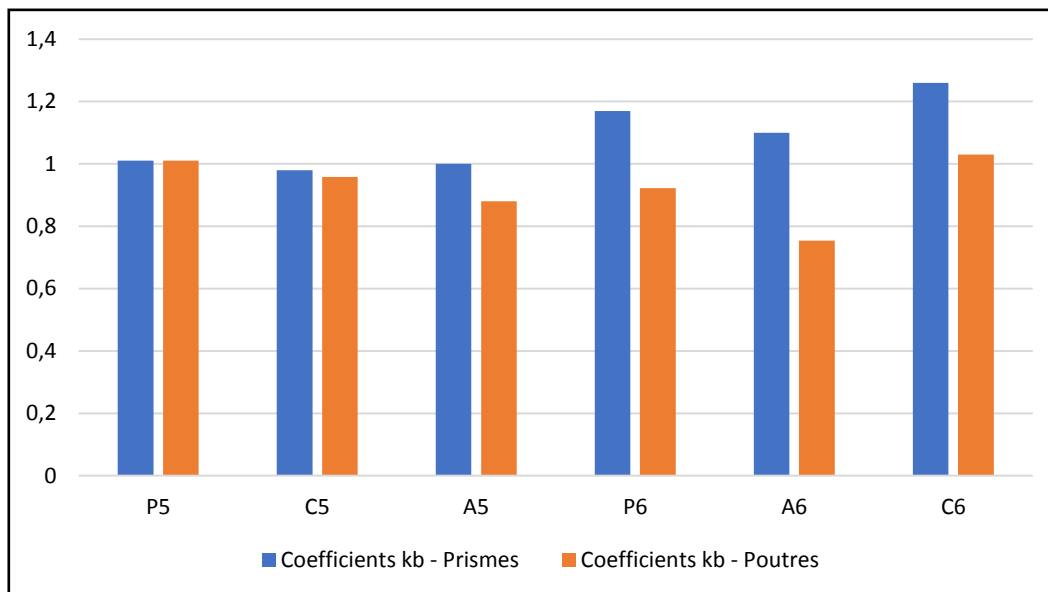


Figure 7.37: Comparaison des coefficients k_b obtenus lors des différents essais

On remarque grâce à cette figure que les coefficients d'adhérence des barres d'armature en PRFV calculés après avoir réalisé les essais des poutres et des prismes sont similaires pour des barres de diamètre nominal 15mm et sont différents pour des barres de diamètre nominal 20mm mais proportionnellement. Le calcul du coefficient permettant de relier les résultats pour les barres de diamètre nominal 20mm a été fait sur la figure suivante.

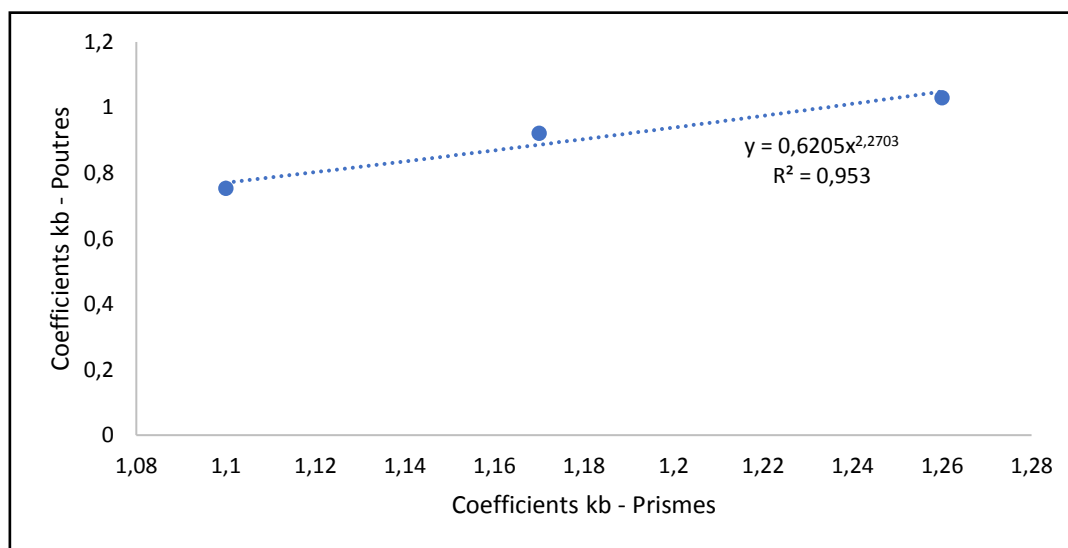


Figure 7.38: Relation entre les coefficients k_b provenant des essais des poutres et des prismes

La figure ci-avant montre une relation entre les coefficients d'adhérence k_b obtenus après avoir réalisé les essais des poutres et les essais des prismes. La droite est presque linéaire et l'équation trouvée permet d'établir un lien entre les coefficients d'adhérence k_b calculés après avoir réalisé les différents essais. Cette étude a été faite sur une petite quantité de prismes. Pour que cela soit plus cohérent et précis, une plus grande quantité de prismes doit être réalisée pour des barres d'armature en PRFV de diamètre 15mm, 20mm mais également 25mm puisque dans ce projet nous ne les avons pas testées. Ainsi, d'autres investigations et recherches sont à mener.

CHAPITRE 8 CONCLUSION

L'investigation du coefficient d'adhérence de barres d'armature en PRFV était le principal objectif de ce projet. D'autres objectifs ont été menés également comme le calcul des propriétés des barres en PRFV, ce qui a permis d'évaluer les modules d'élasticité de chaque barre, les charges maximales que peuvent supporter chaque barre, les déformations maximales, etc. grâce aux essais de traction qui ont été effectués. Ceci a été utile pour calculer les coefficients d'adhérence après avoir testé les poutres au laboratoire de l'Université de Sherbrooke. Au total, vingt poutres avaient été testées pour investiguer le coefficient d'adhérence k_b des barres en PRFV et deux poutres similaires avaient été coulées pour permettre d'avoir des résultats proches, et ce fut le cas pour l'ensemble des poutres. Suite à cela, des essais d'arrachement ont été faits pour calculer les forces d'adhérence et visualiser le glissement des barres dans le béton. Une corrélation entre ces essais et ceux des poutres a été cherchée mais aucun résultat n'a mené au calcul des coefficients d'adhérence avec les essais d'arrachement. Des prismes ont donc été testés pour permettre de mieux trouver une corrélation entre ces tests et ceux des poutres. Quelques résultats ont émergé, notamment au niveau du calcul des coefficients d'adhérence avec les prismes.

Dans le futur, d'autres investigations sont donc à mener concernant le coefficient d'adhérence k_b , notamment au niveau des prismes puisqu'il n'y avait pas assez de spécimens réalisés pour avoir des résultats assez précis

LISTE DES RÉFÉRENCES

- ACI Committee 408 (1992), *State-of-the-art report on bond under cyclic loads*. American Concrete Institute, Detroit, p. 3-7.
- ACI Committee 440 (2006), *Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars (ACI 440.1R-06)*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- Ahmed, E. A., El-Salakawy, E., Benmokrane, B. (2008), *Bond Stress-Slip Relationship and Development Length of Bars Embedded in Concrete*. HBRC Journal, Vol. 4, No. 3
- Aly, R., Benmokrane, B., Ebead, U. (2006), *Tensile lap splicing of fibre-reinforced polymer reinforcing bars in concrete*. ACI Structural Journal, Vol. 103, No. 6, pp. 857-864.
- ASTM Standard D7205 / D7205M-06 (2011). *Standard test method for tensile properties of fiber reinforced polymer matrix composite bars*. ASTM D7205 / D7205M-06, ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia, Pa 19103.
- ASTM D7913 / D7913M – 14. *Standard Test Method for Bond Strength of Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite Bars to Concrete by Pullout Testing*. ASTM D7913 / D7913M – 14, ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia, Pa 19103.
- Benmokrane, B., Tighiouart, B., Chaallal, O. (1996). *Bond strength and load distribution of composite GFRP reinforcing bars in concrete*. ACI Materials Journal, Vol. 93, No 3, p. 246- 253.
- CSA A23.1/A23.2 (2014). *Concrete materials and methods of concrete construction/Test methods and standard practice for concrete*. Canadian Standards Association, Ontario, Canada
- CAN/CSA-S806 (2012). *Design and Construction of building components with fibre-reinforced polymers*. Canadian Standards Association, Ontario, Canada.
- Elgabbas, F., Ahmed, E. A., Benmokrane, B. (2016). *Experimental Testing of Concrete Bridge-Deck Slabs Reinforced with Basalt-FRP Reinforcing Bars under Concentrated Loads*. Journal of Bridge Engineering, Vol. 29, Issue 7.
- El-Nemr, A., Ahmed, E. A., Benmokrane, B. (2013). *Flexural Behavior and Serviceability of Normal- and High-Strength Concrete Beams Reinforced With Glass Fiber – Reinforced Beams*. ACI Structural Journal, Vol. 110, No 6.

- El-Nemr, A., Ahmed E. A., Barris, C., Benmokrane, B. (2016). *Bond-dependent coefficient of glass- and carbon-FRP bars in normal- and high-strength concretes*. Construction and building materials, Vol. 113, p. 77-89.
- El-Salakawy, E., Benmokrane, B., Desgagné, G. (2003). *Fibre-reinforced polymer composite bars for the concrete deck slab of Wotton Bridge*. Can. J. Civ. Eng. Vol. 30, 2003.
- Hattori, A., Inoue, S., Miyagawa, T., Fujji, M. (1995). *A study on bond creep behaviour of FRP rebars embedded in concrete*. 2nd International Symposium, RILEM Proceedings, Issue 29, p. 172-179.
- Hutchinson, R., Abdelrahman, A., Rizkalla, S.H. (1998). *Shear Strengthening Using FRP Sheets for a Concrete Highway Bridge in Manitoba, Canada*. Second International Conference on Composites in Infrastructure (ICCI '98), January 5 to 7, 1998, Tucson, Arizona.
- ISIS Manual No.3 (2007). *Design Manual No. 3: Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers*. The Canadian Network of Centers of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada, p. 151.
- Kotynia, R., Szczech, D., Kaszubska, M. (2017). *Bond Behavior of GRFP Bars to Concrete in Beam Test*. Procedia Engineering, Vol. 193, p. 401-408.
- Okelo, R., Yuan, R. L. (2005). *Bond strength of fibre reinforced polymer rebars in normal strength concrete*. Journal of Composites for Construction, Vol. 9, No 3, p. 203-213.
- Mazaheripour, H., Barros, J. A. O., Sena-Cruz, J.M., Pepe, M., Martinelli, E. (2013). *Experimental Study on Bond Performance of GFRP Bars in Self-Compacting Steel Fiber Reinforced Concrete*. Composite Structures, Vol. 95, p. 202-212.
- Pleiman, L.G. (1991). *Strength, modulus of elasticity, and bond of deformed FRP rods*. Proceeding of the Conference on Advanced Composite Materials in Civil Engineering Structures, American Society of Civil Engineers (ASCE), New York. p. 99-110.
- Shen, D., Ojha, B., Shi, X., Zhang, H., Shen, J. (2016). *Bond stress–slip relationship between basalt fiber-reinforced polymer bars and concrete using a pull-out test*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 35 (9), p. 747-763.
- Tighiouart, B., Benmokrane, B., Gao, D. (1998). *Investigation of bond in concrete member with fibre reinforced polymer (FRP) bars*. Construction and Building Materials, Vol. 12, p.

453-462.

Walsh, P. J. (2001). *Carbon Fibers*. ASM International, ASM Handbook. Material Park, Ohio, p. 35-40.

Wei, B., Cao, H., Song, S. (2010). *Tensile behavior contrast of basalt and glass fibers after chemical treatment*. Materials & Design, Vol. 31, Issue 9, p. 4244-4250.